

# **Estudo do Comportamento ao Fogo de Ligações Viga-Pilar em Estruturas de Aço**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

**Autor**

**Tiago Miguel Simões Martins**

**Orientador**

**Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia**

Professor Adjunto do DEC - ISEC

**Coimbra, Maio, 2018**



## AGRADECIMENTOS

Superar este desafio que marca o final de uma etapa muito importante para mim, só foi possível com o contributo de várias pessoas, assim gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a sua concretização.

Antes de mais, quero agradecer ao Professor Doutor António José Pedroso de Moura Correia, pela orientação científica deste trabalho, por todos os ensinamentos que me transmitiu e sobretudo pela disponibilidade demonstrada para superar todas as dificuldades que surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Não poderia finalizar este percurso sem agradecer aos restantes professores com quem me cruzei no percurso académico, quer dos diferentes departamentos do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, quer de todas as instituições de ensino que frequentei, que contribuíram de forma ativa para a minha aprendizagem.

Estou grato ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela qualidade do seu ensino, pelas condições quer das infraestruturas quer nos recursos que disponibiliza a todos os seus alunos.

À Engenheira Sara da Conceição de Matos Silva, uma palavra de agradecimento por todos os ensinamentos que me transmitiu ao longo da minha ainda curta carreira profissional, pelo apoio que sempre demonstrou ao longo deste trabalho.

E quando desistir seria o caminho mais fácil, houve sempre alguém que me impediu de o tomar, não poderia terminar esta etapa sem agradecer à minha namorada Dina Alexandra Ferreira de Sousa, pelo apoio incondicional ao longo deste percurso.

Ao Hugo Simões Martins meu irmão, agradecer o apoio demonstrado durante todos estes anos, obrigado por forçares a gargalhada quando as coisas corriam menos bem.

E por fim às pessoas que tornaram tudo isto possível, ídolos de sempre e para sempre, aos meus queridos pais, Altino Simões Martins e Maria Amália Martins Lobo, estiveram sempre presentes nos bons e maus momentos, sem os sacrifícios deles jamais tudo isto seria possível, por isso um obrigado será sempre pouco, por isso espero que a etapa que agora termino possa retribuir e compensar o carinho, apoio, dedicação e confiança que sempre me transmitiram. A eles dedico este trabalho.





## RESUMO

A utilização de estruturas metálicas na construção civil, tem vindo a ser cada vez mais recorrente, pois o recurso a este tipo de solução têm-se revelado bastante benéfica, dada a leveza, resistência e facilidade quer no fabrico quer na montagem em obra, bem como as vantagens relativas à sustentabilidade na construção. No entanto o aço mostra algumas debilidades na ocorrência de fogo e consequente aumento da temperatura, pois nesta situação tem um desempenho inferior quando comparado com outro tipo de soluções estruturais como por exemplo estruturas em betão armado, originando por vezes o recurso a medidas de proteção dos elementos, que implicam custos adicionais. As ligações dos elementos no desenvolvimento da estrutura, são elementos críticos e em situação de incêndio estão sujeitos a esforços substancialmente diferentes dos ocorridos à temperatura ambiente, a rotura de um destes elementos pode ser fatal para uma estrutura, podendo levar a mesma ao colapso parcial ou total. Neste trabalho são analisados modelos numéricos, com recurso ao *software* ABAQUS, tendo sido modelados três tipos de ligação pilar-viga. O foco de estudo é a zona da ligação pelo que só se aqueceu a zona circundante da mesma, não se aquecendo a parte superior dos pilares, por se encontrar parcialmente protegido devido ao contacto com a laje.

**Palavras-Chave:** Ligação Pilar-Viga, Fogo, Aço, Resistência ao Fogo.

## ABSTRACT

The use of steel structures in civil construction has been increasingly recurrent, as the use of this type of solution has proved to be very beneficial, given the lightness, strength and ease of manufacture and assembly on site, such as the advantages related to sustainability in construction. However, the steel shows some weaknesses in the occurrence of fire and consequent increase of temperature, because in this situation it performs badly when compared with other type of structural solutions like for example structures made of reinforced concrete, sometimes giving rise to the use of measures of protection with additional costs. The connections of the elements in the development of a structure, are critical elements and in the fire situation are subjected to substantially different efforts than those occurred at ambient temperature, the rupture of one of these elements may be fatal to a structure and may lead to partial collapse or total. In this work, numerical models using ABAQUS software were analyzed, and three types of column-beam connection were modeled. The focus of study is the zone of the connection, whereby only the surrounding area is heated, the upper part of the pillars not being heated because it is partially protected due to contact with the slab.

**Keywords:** Pillar-beam connection; Fire; Steel; Fire Resistance.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Considerações Gerais .....	1
1.2.	Objetivos da Pesquisa .....	2
1.3.	Estrutura da Dissertação .....	3
2.	ESTADO DA ARTE.....	4
2.1.	Ensaaios experimentais.....	4
2.2.	1976.....	4
2.3.	1990.....	4
2.4.	1995-1996 .....	7
2.5.	1997.....	10
2.6.	1998.....	14
2.7.	Métodos dos Elementos Finitos.....	18
2.8.	1996 - 1998.....	18
2.9.	2004.....	19
2.10.	2007.....	22
2.11.	2007.....	27
2.12.	2014.....	30
3.	COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES EM AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	34
3.1.	Propriedades mecânicas do aço.....	34
3.2.	Propriedades térmicas do aço.....	35
3.3.	Classificação das ligações em aço .....	37
3.4.	3.4 Método dos Componentes.....	38
3.4.1	– Exemplo de um modelo desenvolvido pelo Método das Componentes .....	39
3.5.	Aspetos revelantes.....	45
3.6.	Comportamento das ligações e integridade estrutural .....	45
3.7.	Comportamento das vigas e ação em catenária .....	46
3.8.	Interação com a estrutura adjacente.....	46
3.9.	Fase de arrefecimento .....	46
3.10.	Colapso progressivo .....	46
4.	MODELAÇÃO NUMÉRICA .....	46
4.1.	ABAQUS.....	47
4.2.	Modulação numérica com o programa ABAQUS.....	48
4.3.	Estruturação dos modelos analisados.....	57
4.4.	Definição das ações.....	58
4.5.	Aplicação das ações.....	59
4.6.	Definição da malha de Elementos Finitos .....	60

4.7.	Análise .....	60
4.8.	Resultados .....	61
4.9.	Plano de ensaios.....	61
4.10.	Modelo 1 .....	62
4.11.	Modelo 2 .....	62
4.12.	Modelo 3 .....	63
4.13.	Modelo 4 .....	64
4.14.	Modelo 5 .....	64
4.15.	Modelo 6 .....	64
4.16.	Modelo 7 .....	65
4.17.	Modelo 8 .....	66
4.18.	Modelo 9 .....	66
4.19.	Modelo 10 .....	67
4.20.	Modelo 11 .....	67
4.21.	Modelo 12 .....	68
4.22.	Características dos elementos analisados.....	68
5.	RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	69
5.1.	Efeitos da carga aplicada com e sem ação térmica.....	69
5.2.	Conclusões.....	81
	Bibliografia .....	83



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de ligação viga pilar utilizado nos ensaios experimentais (LAWSON, 1990). .....	6
Figura 2: Evolução da temperatura em ensaio de ligação mista (LAWSON, 1990). .....	6
Figura 3: Planta do edifício. ....	8
Figura 4: Deformação das vigas no 5º ensaio (BURGESS I. e., 2012). ....	9
Figura 5: Modo de rotura de ligação com chapa de <i>gousset</i> (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991). 9	
Figura 6: Modo de rotura de ligação com chapa de extremidade flexível (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991). ....	10
Figura 7: Deformação do banzo inferior da viga na zona junto ao pilar (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991). ....	10
Figura 8: Características de uma ligação viga-pilar ensaiada. ....	11
Figura 9: Modelo de ligação mista com chapa flexível. ....	14
Figura 10: Vista em alçado da configuração dos ensaios (LIU, FAHAD, & DAVIES, 2002). ....	15
Figura 11: Vista em planta da configuração dos ensaios (LIU, FAHAD, & DAVIES, 2002). ....	15
Figura 12: Expansão térmica da viga (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002). ....	16
Figura 13: Viga em Catenária (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002). ....	16
Figura 14: Curvas temperatura-compressão axial para diferentes graus de rigidez (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002). ....	17
Figura 15: Curvas temperatura-deformação para diferentes graus de rigidez (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002). ....	17
Figura 16: Evolução da deformação do banzo do pilar (LIU T. , Fire resistance of unprotected steel beams with moment connections, 1999). ....	19
Figura 17: Modelação em elementos finitos da ligação com chapa de <i>gousset</i> (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	20
Figura 18: Carregamento e condições de fronteira da ligação com chapa de <i>gousset</i> (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	20
Figura 19: Diagrama de deformação plástica da ligação na direção x (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	20
Figura 20: Diagrama de deformação plástica do pilar na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	20
Figura 21: Diagrama de deformação plástica da ligação na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	21
Figura 22: Diagrama de deformação da chapa de <i>gousset</i> na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	21
Figura 23: Diagrama de deformação da ligação na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	21
Figura 24: Diagrama de deformação dos parafusos na direção x (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). ....	21
Figura 25: Composição dos modelos estudados (SARRAJ, 2007). ....	22
Figura 26: Superfícies de contacto (SARRAJ, 2007). ....	23
Figura 27: Tensão de Von Mises na Ligação em Estudo (SARRAJ, 2007). ....	23
Figura 28: Curvas momento-rotação à temperatura ambiente do modelo Sarraj e dos ensaios de Richard (SARRAJ, 2007). ....	24

Figura 29: Curvas da temperatura na alma e no banzo inferior da viga (a vermelho) e no banzo superior da viga (a tracejado azul) em função do tempo decorrido (SARRAJ, 2007). .....	24
Figura 30: Curvas deslocamento (a meio vão) -temperatura (SARRAJ, 2007). .....	25
Figura 31: Deformações do Modelo de elementos finitos tendo em conta a simetria (SARRAJ, 2007). .....	25
Figura 32: Deformação da viga e da ligação nos ensaios de Wald (SARRAJ, 2007). .....	26
Figura 33: Curvas tempo-deformação (no ponto de aplicação da carga) dos ensaios de Wald <i>et al.</i> e do modelo de Sarraj <i>et al.</i> (SARRAJ, 2007). .....	26
Figura 34: Modelo 3D da chapa de extremidade (a), do banzo do pilar (b) e dos parafusos (c) (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006). .....	27
Figura 35: Modo de rotura nos ensaios experimentais (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006). .....	28
Figura 36: Modo de rotura no modelo de elementos finitos (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006). .....	28
Figura 37: Deformação da chapa de extremidade (a), do banzo do pilar (b) e dos parafusos (c) (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006). .....	29
Figura 38: Curvas momento-rotação-temperatura dos ensaios experimentais e do modelo de EF (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006). .....	29
Figura 39: Curvas temperatura-rotação dos ensaios experimentais e do modelo de EF para diversos carregamentos (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006). .....	30
Figura 40- A rosa está representada a zona de aplicação da temperatura. ....	31
Figura 41- a) Deformações da estrutura, b) Detalhe do colapso do pilar inferior. ....	32
Figura 42 - Modelo utilizado no Abaqus v6.12. ....	32
Figura 43- a) Deformações ocorridas no ensaio experimental; b) Deformações no modelo de elementos finitos. ....	33
Figura 44: Ligações viga-pilar típicas (RESENDE, 2009). ....	37
Figura 45: Classificação das ligações quanto à resistência (RESENDE, 2009). ....	38
Figura 46- Modelo dividido em zonas de tração, compressão e corte. ....	39
Figura 47 - Modelo de componentes de uma ligação simples com chapa de extremidade rasa. ....	40
Figura 48- Ligação simples com chapa de extremidade rasa. ....	40
Figura 49 - Modelo de componentes com mola equivalente Keqt. ....	41
Figura 50- Diagrama de distribuição de forças. ....	42
Figura 51- Planta do modelo de deformação na zona de tração. ....	42
Figura 52- Modelo de componentes com um único alinhamento de parafusos. ....	42
Figura 53- Curvas momento-rotação à temperatura ambiente obtidas a partir do modelo de componentes e de ensaios experimentais para ligações simples. ....	43
Figura 54- Evolução do fator de retenção da rigidez (esquerda); evolução do fator de retenção da resistência (direita), com o aumento da temperatura. ....	44
Figura 55- Curvas tempo-rotação do modelo e dos ensaios experimentais do grupo de ensaios 2 (Esquerda); Curvas tempo-rotação do modelo e dos ensaios experimentais do grupo de ensaios 4 (Direita). ....	45
Figura 56- Janela de trabalho ABAQUS CAE. ....	48
Figura 57- Janela de diálogo para criação de uma <i>Part</i> . ....	49
Figura 58: a) cantoneira com <i>Gousset</i> ; b) Cantoneira de alma; c) Pilar. ....	50
Figura 59- Gerador de materiais. ....	50
Figura 60- Editor de material. ....	50
Figura 61: Lista de características IPE240. ....	51

Figura 62: a) Zoom zona da ligação; b) Modelo completo.....	51
Figura 63- Janela de diálogo do módulo STEP.....	52
Figura 64 - Editor do Step Carga.....	52
Figura 65- Editor Step Fogo.....	53
Figura 66- Editor Step Carga Rotura.....	53
Figura 67- Radiação.....	54
Figura 68- Convecção.....	54
Figura 69: Superfícies expostas à condição ambiente; b) superfícies expostas ao fogo.....	55
Figura 70: a) Aplicação da carga; b) Ampliação à zona de aplicação da carga.....	55
Figura 71: a) Malha em todos os elementos; b) Malha em cantoneira.....	56
Figura 72: Tensão de Von Mises na ligação; b) Tensão de Von Mises na extremidade da viga.....	57
Figura 73: Detalhe do elemento finito C3D8RT.....	57
Figura 74: Ordem de aplicação da ação.....	58
Figura 75: Especificações do Step Carga.....	58
Figura 76: Especificações do Step Fogo.....	58
Figura 77: a) Convecção Ambiente; b) Radiação Ambiente; c) Superfície (a vermelho) de aplicação ação.....	59
Figura 78: a) Convecção Fogo; b) Radiação Fogo; c) Superfície (a vermelho) de aplicação da ação....	60
Figura 79: Características da malha.....	60
Figura 80: Painel de edição do trabalho virtual.....	61
Figura 81: Módulo <i>Visualization</i> , tensões <i>Von Mises</i> .....	61
Figura 82: Perspetivas da ligação no Modelo 1.....	62
Figura 83: Perspetivas da ligação no Modelo 2.....	63
Figura 84: Perspetivas da ligação no Modelo 3.....	63
Figura 85: Perspetivas da ligação no Modelo 4.....	64
Figura 86: Perspetivas da ligação no Modelo 5.....	65
Figura 87: Perspetivas da ligação no Modelo 6.....	65
Figura 88: Perspetivas da ligação no Modelo 7.....	66
Figura 89: Perspetivas da ligação no Modelo 8.....	68
Figura 90: Perspetivas da ligação no Modelo 9.....	68
Figura 91: Perspetivas da ligação no Modelo 10.....	68
Figura 92: Perspetivas da ligação no Modelo 11.....	68
Figura 93: Perspetivas da ligação no Modelo 12.....	68
Figura 94: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 1.....	70
Figura 95: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 2.....	71
Figura 96: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 3.....	72
Figura 97: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 4.....	73
Figura 98: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 5.....	74
Figura 99: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 6.....	75
Figura 100: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 7.....	76
Figura 101: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 8.....	77
Figura 102: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 9.....	78
Figura 103: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 10.....	79
Figura 104: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 11.....	80
Figura 105: Deformação à Temperatura Ambiente do Modelo 12.....	81





**ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1: Tipos de ligação utilizados e orientação dos respetivos ensaios (LAWSON, 1990). ....	5
Quadro 2: Caraterísticas das ligações. ....	12
Quadro 3: Carregamentos aplicados nos ensaios. ....	13
Quadro 4: Composição dos modelos analisados. ....	62

**ÍNDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 1: Curva tensão-deformação do aço a temperaturas elevadas (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010). .....	34
Gráfico 2: Fatores de redução para a relação de tensão-deformação do aço, a temperaturas elevadas (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010). .....	35
Gráfico 3: Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010). .....	36
Gráfico 4: Calor específico do aço carbono em função da temperatura (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010). .....	36
Gráfico 5: Condutibilidade térmica do aço carbono em função da temperatura (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010). .....	36
Gráfico 6: Força-deslocamento modelo 1.....	70
Gráfico 7: Força-deslocamento modelo 2.....	71
Gráfico 8: Força-deslocamento modelo 3.....	72
Gráfico 9: Força-deslocamento modelo 4.....	73
Gráfico 10: Força-deslocamento modelo 5.....	74
Gráfico 11: Força-deslocamento modelo 6.....	75
Gráfico 12: Força-deslocamento modelo 7.....	76
Gráfico 13: Força-deslocamento modelo 8.....	77
Gráfico 14: Força-deslocamento modelo 9.....	78
Gráfico 15: Força-deslocamento modelo 10.....	79
Gráfico 16: Força-deslocamento modelo 11.....	80
Gráfico 17: Força-deslocamento modelo 12.....	81

## **ABREVIATURAS**

**EF** – Elemento(s) Finito(s)

**MEF** – Método dos Elementos Finitos

**M<sub>pl</sub>** – Momento Plástico da Viga

**WTC** - *World Trade Center*





## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Gerais

O fogo é um dos fenómenos naturais que em situação de descontrolo pode ter consequências graves, tanto ao nível socioeconómico como ao nível da vida humana. Por estas razões, o estudo deste fenómeno ocorrido em edifícios tem sido alvo de maior incidência. A intensificação do estudo do comportamento das estruturas em situação de incêndio, deu-se, em especial, após o colapso dos edifícios do *World Trade Center*, sendo que o referido acidente tem contribuído de forma bastante significativa, para um conhecimento mais aprofundado sobre esta temática. Ainda assim, o comportamento de uma estrutura tem fatores que tornam a sua análise um trabalho bastante complexo, pois a geometria, disposição dos elementos estruturais e propriedades dos materiais, influenciam de forma significativa o comportamento de uma qualquer estrutura em análise. Se aliarmos a todos estes fatores a ocorrência de um incêndio, também este é um fenómeno complexo, uma vez que tem associado a si condicionantes tais como, modo de propagação, tempo de ocorrência e carga combustível.

A introdução do aço na construção civil, há mais de século e meio, resultou na necessidade de mudança de práticas e métodos na engenharia civil, bem como uma revolução na paisagem edificada. A utilização do aço como o único material constituinte dos elementos estruturais, tem ganho grande destaque, uma vez que apresenta características bastante favoráveis para responder de forma eficaz aos desafios da construção, quando comparado com o betão armado e a tradicional alvenaria e a relação peso/resistência possibilita vencer maiores vãos. Contudo, existem características transversais à maioria dos materiais, na ocorrência de um incêndio, e os materiais utilizados na construção sofrem uma degradação da sua capacidade resistente. O aço é um material que apresenta uma elevada condutibilidade térmica, o que faz com que seja uma desvantagem face a outras soluções. Assim, têm-se intensificado as análises do aço quando sujeito ao fogo a temperaturas elevadas, para que se possa fazer um dimensionamento estrutural com características que possibilitem minimizar os danos, nomeadamente conferir-lhe resistência de forma a que, em situação de incêndio, o mesmo possa ser evacuado antes do colapso.

O colapso de uma qualquer estrutura pode ocorrer pelas mais variadas razões, bem como pelos diversos elementos que a compõem. No entanto, as ligações entre elementos que constituem uma qualquer estrutura, são sempre elementos críticos e objeto de uma análise mais cuidada. No caso de uma estrutura metálica, as ligações em caso de incêndio estão sujeitas a esforços bem diferentes dos que ocorrem em situações normais pois, em casos extremos, a falha de uma ligação pode promover o colapso da estrutural global. Nas últimas décadas têm-se intensificado o estudo destas ligações quando sujeitas ao fogo, para tal, foram realizados ensaios experimentais, estudos numéricos e analíticos, que têm contribuído de forma ativa para o desenvolvimento das metodologias de cálculo que hoje constam nas normas europeias.

Um dos acidentes mais mediáticos deu-se a 11 de Setembro de 2001, no *World Trade Center* em Nova Iorque, e o Edifício 5 foi atingido pelos estilhaços provenientes da Torre Norte, uma vez que a estrutura colapsou parcialmente, após algumas horas sujeita a chamas intensas. As investigações feitas com observação dos destroços, foram conclusivos e apontam que as razões

do colapso devem-se à rotura das chapas de *Gousset* que uniam as vigas Gerber aos segmentos adjacentes aos pilares no 8º piso e, o colapso dos pisos inferiores, deve-se à queda do referido piso, resultando no que se apelida de colapso progressivo de uma estrutura.

De modo a que no futuro a tendência seja minimizar danos, é fundamental ter uma visão cada vez mais realista do comportamento destas estruturas durante a ocorrência do fogo. Para tal, é necessário recorrer a ensaios isolados ou à escala global. Os ensaios isolados são realizados em estruturas parciais, que são coladas em fornos e sujeitas a altas temperaturas, revelando-se um método bastante vantajoso para a análise de elementos específicos, como parafusos soldaduras, chapas por exemplo. No entanto, o facto de estarmos a estudar uma parte específica existem parâmetros que poderão ficar desfasados da realidade, uma vez que neste tipo de ensaio não é tido em conta a rigidez global da estrutura. As limitações nos ensaios levaram então à realização de ensaios à escala global, que consistem na construção da estrutura do tipo que se pretende analisar, e esta, é sujeita a um incêndio real. Estes ensaios revelam-se bastante vantajoso no entanto, os custos associados a este tipo de ensaio são muito elevados, o que a sua realização depende em muito dos programas de investigação de grande dimensão.

O Método dos Elementos Finitos (MEF), é outra forma de estudar o comportamento dos materiais ao fogo, e tem vindo a ganhar uma importância muito grande junto dos investigadores, uma vez que permite uma análise com resultados de precisão elevada. A obtenção de resultados válidos com o recurso ao MEF, depende em muito do rigor com que a modelação foi executada, assim, para que se possam validar os resultados obtidos, é necessário ter em atenção a geometria dos elementos, as propriedades dos materiais, a configuração da malha e a forma como se simula o contacto entre os elementos. Outra vantagem dos MEF, face a outros métodos utilizados no estudo comportamental dos elementos sujeitos ao fogo, prende-se com a possibilidade de obter com clareza o mecanismo de rotura, bem como a medição rigorosa dos deslocamentos ocorridos.

## **1.2. Objetivos da Pesquisa**

A presente dissertação tem como objetivo o estudo do comportamento da zona da ligação pilar-viga com recurso ao Método dos Elementos Finitos. O estudo foi assente numa análise isolada da zona da ligação pilar-viga, foram utilizados três modelos de ligação distintos, aplicados a perfis metálicos de classe resistente diferente, onde se pretende analisar que tipo de deformações ocorre, bem como a grandeza dos deslocamentos registados nos elementos analisados, sabendo que este tipo de análise pode estar desfasada do tipo de deformações ocorridas numa estrutura global. Neste estudo não são contempladas as condicionantes existentes numa estrutura real ainda assim, os resultados obtidos podem ser uma boa ferramenta para estudos futuros.



### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A dissertação está dividida em cinco capítulos.

No presente capítulo, realiza-se uma descrição breve do trabalho proposto, bem como a importância das ligações em estruturas metálicas quando sujeitas a temperaturas elevadas, bem como os objetivos do estudo realizado.

No capítulo 2, Estado da Arte, são apresentados alguns dos estudos mais importantes de forma cronológica, ensaios experimentais e estudos desenvolvidos com MEF, em ligação pilar-viga sujeita a temperaturas elevadas em estruturas metálicas.

No capítulo 3, Comportamento das Ligações em Aço em Situação de Incêndio, neste capítulo apresentam-se algumas das características do aço, à temperatura ambiente e em condições de incêndio, também são apresentadas considerações relevantes sobre ligações.

No capítulo 4. Modelação Numérica, apresenta de uma forma breve algumas das ferramentas do *software* ABAQUS, bem como a apresentação das opções tomadas e respetiva justificação para os modelos estudados.

No capítulo 5, Resultados e Conclusões, onde são analisados os resultados obtidos pela modelação, e apresentadas as conclusões que deles provêm.

No capítulo 6, Referências Bibliográficas, contemplando as referências analisadas.

Anexos, onde são apresentados, cálculos, fotografias dos ensaios e imagens das simulações numéricas.

## 2. ESTADO DA ARTE

O presente capítulo resume toda a pesquisa bibliográfica utilizada no desenvolvimento deste trabalho, sendo constituído por análises de artigos, normas e relatórios onde constam abordagens ao tema desta dissertação.

São apresentadas em forma resumo as evoluções que o estudo desta temática tem sido alvo, não só por ensaios, mas também com recurso aos métodos dos elementos finitos na análise do comportamento das ligações ao fogo.

### 2.1. Ensaios experimentais

Na ocorrência de um incêndio existe dificuldade em conseguir analisar o comportamento das ligações. Por esta razão, os investigadores tiveram a necessidade de recorrer a ensaios experimentais para que se obtenha uma melhor compreensão do comportamento das ligações na presença do referido fenómeno. Neste subcapítulo, são apresentados cronologicamente os ensaios que contribuíram mais significativamente para que hoje se possua um conhecimento mais aprofundado do comportamento das ligações sujeitas a temperaturas elevadas.

#### 2.2. 1976

Kruppa conduziu em 1976, um dos primeiros ensaios experimentais em ligações metálicas sujeitas a altas temperaturas. O ensaio isolado foi desenvolvido no *Centre Technique Industriel de la Construction*, em França e, o objetivo do referido ensaio, prendeu-se com o estudo do comportamento dos parafusos de alta resistência a temperaturas elevadas. Para o efeito, foram utilizados seis tipos de ligação, sendo o grau de flexibilidade o parâmetro que diferia entre elas. Estas ligações foram sujeitas a um aumento de temperatura gradual, de acordo com a curva de incêndio padrão ISO 834. A estrutura considerada para além do pilar e viga, ligados entre si, com as ligações já mencionadas, contemplava uma laje de betão no topo do banzo das vigas. Esta laje foi colocada com o objetivo de criar uma barreira ao fluxo de calor mas, para este ensaio, a ação estrutural da laje não foi considerada. Após a análise das deformações ocorridas no ensaio, concluíram que as deformações ocorridas nos restantes elementos precediam ao colapso dos parafusos. Deste modo, podia concluir-se por um lado, que os parafusos tinham um desempenho inferior aos restantes elementos da estrutura, por outro, uma deformação excessiva dos restantes elementos poderiam provocar uma rotação elevada nos parafusos. No seguimento destes ensaios não surgiram quaisquer indicações práticas no que diz respeito ao dimensionamento de ligações.

#### 2.3. 1990

No Reino Unido, em 1990, Lawson conduziu no *Warrington Fire Research Centre*, uma série de onze ensaios, com o objetivo de estabelecer regras simples para o dimensionamento de vigas expostas ao fogo, tendo em conta a continuidade viga-pilar (LAWSON, 1990). Foram produzidos ensaios em três tipos de ligação: chapa de extremidade rasa, chapa de extremidade

estendida e dupla cantoneira de alma. Em oito dos onze ensaios, foram utilizadas ligações simples, os três restantes foram em ligação mista (ver Gráfico 1). Nestes últimos, havia o objetivo de perceber de que forma uma laje de betão influenciava o comportamento global da ligação. Os modelos ensaiados foram todos construídos com: vigas – 305 x 165 x 40 UB (S275); pilares – 203 x 203 x 52 UC (S275); parafusos – 6 x M20 (classe 8.8) e chapas – espessura 12mm.

Quadro 1: Tipos de ligação utilizados e orientação dos respetivos ensaios (LAWSON, 1990).

	Tipo de Ligação	Nº de Ensaios	Orientação do ensaio
Ligação Simples	Chapa de extremidade estendida	2	Ligação viga-pilar, no banzo do pilar
	Chapa de extremidade rasa	2	Ligação viga-pilar, no banzo do pilar
	Chapa de extremidade rasa	1	Ligação viga-pilar, na alma do pilar
	Chapa de extremidade rasa	1	Ligação viga-viga, na alma da viga
	Dupla cantoneira de Alma	1	Ligação viga-pilar, no banzo do pilar
	Dupla cantoneira de Alma	1	Ligação viga-viga, na alma da viga
Ligação Mista	Chapa de extremidade rasa	1	Ligação viga-pilar, no banzo do pilar
	Chapa de extremidade rasa	1	Ligação viga-viga, na alma da viga
	Dupla cantoneira de Alma	1	Ligação viga-pilar, no banzo do pilar

Na realização destes ensaios, foi utilizada a curva de incêndio padrão ISO 834. Estes ensaios tem a particularidade de, em alguns deles, terem sido inseridos mecanismos de proteção, de modo a avaliar a relevância que estes têm no comportamento das estruturas. Os mecanismos utilizados foram: aplicação de proteção ao fogo equivalente a 60 minutos nas vigas e pilares, preenchimento da alma dos pilares com blocos de betão leve e aplicação de fibra mineral nalguns elementos. Os carregamentos efetuados nos ensaios variam entre  $0.10M_{pl}$  e  $0.40M_{pl}$ .

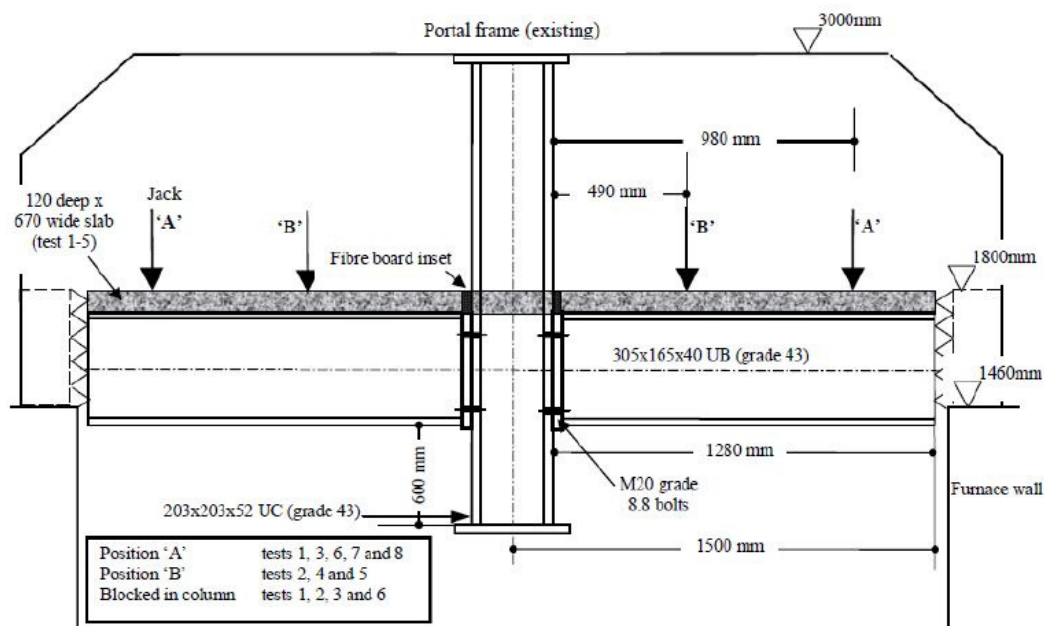


Figura 1: Modelo de ligação viga pilar utilizado nos ensaios experimentais (LAWSON, 1990).

Durante os ensaios, as medições da variação de temperatura incidiram sobre banzos superior e inferior das vigas e nos alinhamentos superior e inferior dos parafusos. Como era expectável, as zonas superiores quer da viga quer dos parafusos, registaram valores de temperatura mais baixos do que as zonas inferiores dos elementos analisados. Na Figura 1 são apresentados sob a forma de gráfico a evolução da temperatura em ensaio de ligação mista. Em todos os ensaios foi também medida a rotação ocorrida na ligação.

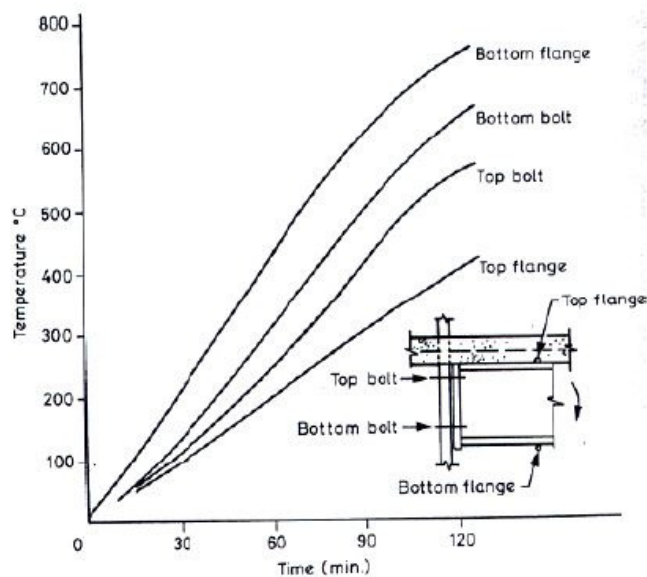


Figura 2: Evolução da temperatura em ensaio de ligação mista (LAWSON, 1990).

Os resultados obtidos demonstraram que este tipo de ligação, quando sujeita a temperaturas elevadas, consegue resistir a momentos elevados. Após a análise dos resultados obtidos nos ensaios, constata-se que este tipo de ligação preserva cerca de dois terços da sua capacidade resistente à temperatura ambiente. Foi possível verificar que as elevadas deformações ocorridas nas chapas de extremidade levaram a ligação ao colapso. Os parafusos também apresentaram deformações consideráveis, mas não apresentaram indícios de rotura. No que diz respeito à rotação, em nenhum dos ensaios foi registada uma rotação superior aos 6 graus. Assim, Lawson sugere que as ligações mistas devido ao contributo da laje na flexão, têm melhor comportamento que as ligações unicamente metálicas, também derivado ao fato de a laje retardar o aquecimento dos elementos metálicos.

#### 2.4. 1995-1996

Depois das diversas comunidades científicas se depararem com os problemas existentes nos ensaios isolados, uma vez que são desprezados várias características intrínsecas de uma estrutura real, nomeadamente as restrições existentes entre elementos e ainda as condições de propagação de um incêndio real, o *Building Research Establishment* e a *British Steel*, levaram a cabo uma série de ensaios num edifício construído para o efeito (MOORE & LENNON, 1997). No laboratório de Cardington, no Reino Unido, o edifício construído era composto por pisos, onde foram utilizadas ligações com chapa de extremidade flexível na ligação viga primária – pilar e ligações com chapa de *gousset* na união viga secundária – viga primária.

Foram realizados os seguintes ensaios:

Ensaio 1 – No sétimo piso do edifício, a viga restringida foi aquecida numa área de  $8 \times 3 \text{ m}^2$ , para avaliar o comportamento de uma viga secundária não protegida, com um vão de 9m restringida axialmente, a viga utilizada era do tipo 305x165UB40. Para fonte de calor foi utilizado um forno de gás colocado debaixo da viga.

Ensaio 2 – Pórtico, no quarto piso foi aquecida uma área de  $21 \times 2.5 \text{ m}^2$ , que abrangia 3 vãos de vigas primárias. À semelhança do ensaio 1, foi utilizado um forno a gás para fonte de calor.

Ensaio 3 – Ensaio de canto 1, no segundo piso foi aquecida uma área de  $10 \times 3 \text{ m}^2$  num canto do referido piso, as paredes deste compartimento eram constituídas por blocos de betão leve, as vigas exteriores e pilares estavam protegidas, as vigas interiores não foram sujeitas a qualquer tipo de proteção antifogo. Neste caso para fonte de calor foi ateado um incêndio em mobiliário de madeira com uma densidade de  $45 \text{ Kg/m}^2$ .

Ensaio 4 – Ensaio de canto 2, no terceiro piso foi aquecida uma área de  $9 \times 6 \text{ m}^2$ , esta área era compartimentada por chapas resistentes ao fogo, os pilares tinham tratamento antifogo, ao invés as vigas interiores e exteriores não tinham nenhum tipo de proteção ao fogo. Tal como no ensaio 3, a fonte de calor foi através de fogo ateado em mobiliário de madeira com densidade de  $45 \text{ Kg/m}^2$ .

Ensaio 5 – Compartimento amplo, para este ensaio foi aquecida uma área de  $21 \times 18 \text{ m}^2$ , delimitada por paredes com tratamento antifogo. À semelhança dos ensaios anteriores, também foi ateado fogo em mobiliário de madeira mas, neste caso, com uma densidade de  $40 \text{ Kg/m}^2$ .

Ensaio 6 – Escritório-tipo, para este ensaio foi utilizada uma área de 18x10m<sup>2</sup>, onde pilares e a ligação pilar-viga levou tratamento antifogo, enquanto as vigas primárias e secundárias ficaram desprotegidas. Como o ensaio visa criar condições o mais próximo das condições reais, foi colocado papel e mobiliário de madeira com uma densidade de 45Kg/m<sup>2</sup> onde foi ateado o fogo.

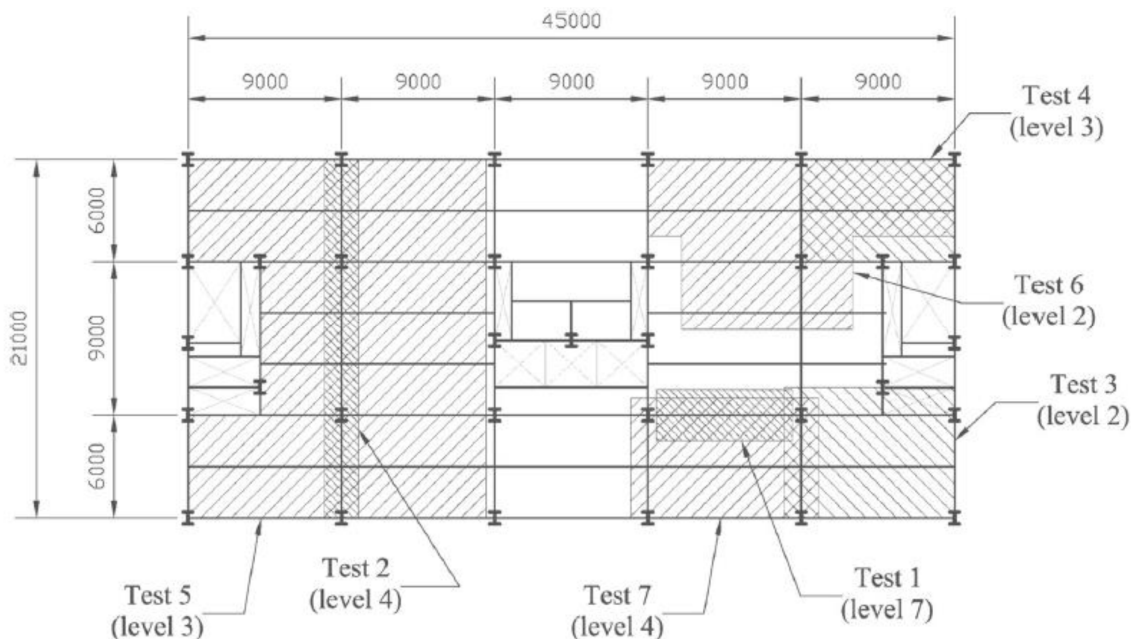


Figura 3: Planta do edifício.

Finalizado o ensaio, observou-se que:

- As vigas apresentam grandes deformações mas, no entanto, não apresentam sinais de colapso, como se pode verificar na Figura 4.
- As ações da viga em catenária, provocaram nas ligações esforços de tração elevados. As chapas de *gousset* colapsaram devido às forças de corte nos parafusos (Figura 5). Na Figura 6 é possível verificar que as ligações com chapas de extremidade apresentam linhas de rotura ao longo da soldadura. Os fenómenos atrás descritos ocorreram na fase de arrefecimento, pelo que serão necessárias investigações futuras na fase de arrefecimento de um incêndio, uma vez que os fenómenos ocorridos não se verificaram nos ensaios isolados.
- As vigas apresentam elevadas deformações no banzo inferior proveniente dos esforços de compressão provocados pela expansão axial da viga ocorrido na fase de aquecimento (Figura 7). O facto da estrutura adjacente não estar sujeita às temperaturas elevadas, conferia-lhes uma rigidez, que acabou por maximizar as deformações ocorridas nas vigas.
- A temperatura do banzo inferior atingiu uma temperatura de aproximadamente 200°C superior à temperatura média ocorrida na ligação, na fase de aquecimento. As temperaturas ocorridas nos alinhamentos inferiores dos parafusos eram superiores às dos alinhamentos superiores, e a chapa de extremidade apresentou temperaturas superiores a ambos alinhamentos dos parafusos.



Figura 4: Deformação das vigas no 5º ensaio (BURGESS I. e., 2012).



Figura 5: Modo de rotura de ligação com chapa de *gousset* (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991).





Figura 6: Modo de rotura de ligação com chapa de extremidade flexível (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991).



Figura 7: Deformação do banzo inferior da viga na zona junto ao pilar (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991).

## 2.5. 1997

Na Universidade de Sheffield, no Reino Unido, em cooperação com *Building Research Establishment* e com o *Steel Construction Institute*, foi desenvolvido um programa de investigação com o objetivo de estabelecer uma relação entre momento – rotação e temperatura,



para vários tipos de ligação mais utilizados na indústria (LESTON-JONES, 1997) . Neste programa estiveram envolvidos dois investigadores Leston-Jones e Al-Jabri, o trabalho de investigação foi dividido em duas fases: a primeira direccionada para o estudo de ligações com chapa de extremidade rasa, conduzida por Leston-Jones, e numa segunda fase conduzida por Al-Jabri. O estudo foi alargado à inclusão de variáveis como a espessura e tamanho dos elementos, o tipo de ligações, características das lajes e o tipo de mecanismo de colapso. Na primeira fase foram feitos uma série de onze ensaios, em que dois deles foram feitos à temperatura ambiente, em ligações mistas e simples. Nesta fase, foram apenas ensaiadas ligações com chapa de extremidade rasa (ver Figura 8) e o modelo construído para o efeito, era do tipo crucifixo, uma vez que se trata da ligação mais utilizada na construção metálica. O aquecimento das peças foi efetuado num forno próprio para o efeito, e a temperatura foi aumentada de uma forma lenta e uniforme (10°C por minuto). Dos nove ensaios realizados com temperaturas elevadas, em cinco foi colocada uma manta de fibra cerâmica sobre o banzo superior da viga para simular a presença de uma laje de betão com 12 cm de espessura. Os restantes ensaios foram efetuados em estruturas simples e o carregamento utilizado foi sempre constante ao longo de cada ensaio, mas os movimentos horizontais das vigas e do pilar foram restringidos. Para a construção dos modelos foram utilizados os seguintes elementos: vigas – 254 x 102 x 22 UB (S275); pilar – 152 x 152 x 23 UC (S275); parafusos – 6 x M16 (8.8); chapas com espessura 12 mm.

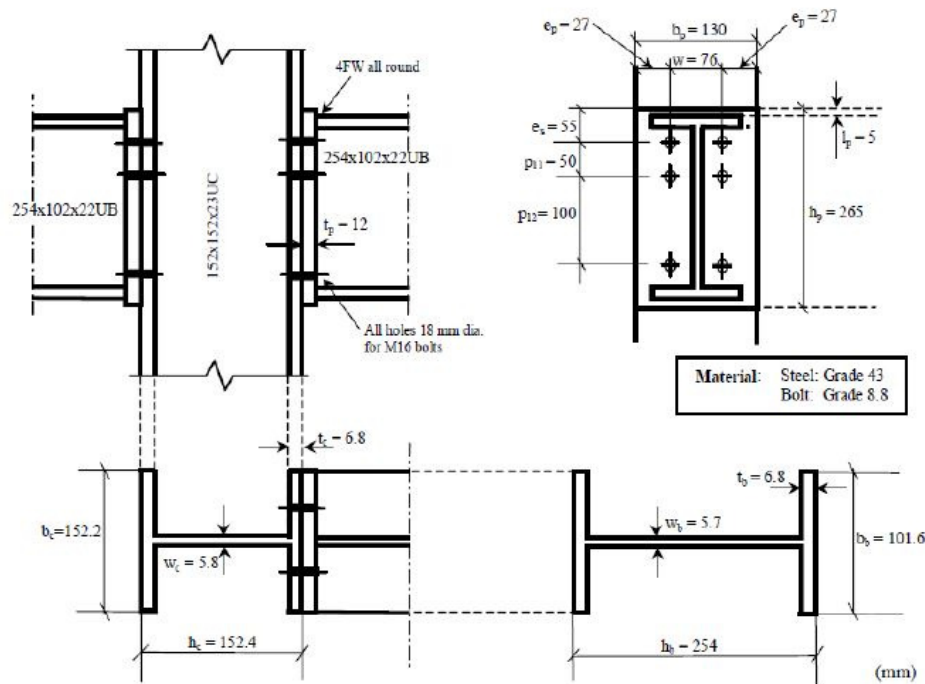


Figura 8: Características de uma ligação viga-pilar ensaiada.

Os ensaios à temperatura ambiente, mostraram a ocorrência de deformações elevadas na alma e no banzo do pilar, nas zonas de compressão e de tração, respetivamente. Nestes ensaios, as

vigas, chapas e parafusos resistiram a momentos de 30 KNm, sem que tenham apresentado deformações muito significativas. Nos ensaios realizados com temperaturas elevadas, foi possível registar uma variação aproximadamente linear da temperatura ao longo da ligação. A rotura nestes ensaios deu-se de uma forma semelhante à ocorrida nos ensaios à temperatura ambiente, no entanto, foi possível verificar um decréscimo gradual da rigidez da ligação bem como da sua capacidade resistente com o aumento da temperatura. Leston-Jones chegou assim a uma temperatura crítica de 500°C e 600°C, a partir da qual a ligação sofreu uma diminuição abrupta da sua capacidade resistente, verificada através do aumento da rotação ocorrida, de uma forma rápida. Os ensaios revelaram resultados bastante importantes para o estudo das ligações em situação de incêndio ainda assim, numa situação real, o aumento da temperatura pode estar desfasado com o utilizado nos modelos.

Na segunda parte deste estudo conduzida por Al-Jabri, foram alterados alguns parâmetros do modelo com o objetivo de perceber qual a sua influência no comportamento da ligação a temperaturas elevadas. Para a referida avaliação foram utilizadas ligações com chapa de extremidade rasa e chapa de extremidade flexível, foram alteradas as dimensões quer de vigas quer de pilares, as espessuras e o tipo das chapas de extremidade, o número e o tipo de parafusos. Nesta fase do estudo foram realizados vinte ensaios, dois dos quais à temperatura ambiente, os restantes foram divididos em cinco grupos. O primeiro grupo serviu para comparar os resultados obtidos com os resultados obtidos por Leston-Jones, na primeira fase deste estudo. No segundo e no terceiro grupo, as ligações foram construídas à semelhança das construídas para o ensaio à escala global desenvolvidos no Laboratório de Cardington, em 1995-1996. Os grupos 4 e 5 são compostos por ligações mistas. Em todos os grupos foram realizados vários ensaios com diferentes carregamentos (ver Quadro 2), executados em ligação viga-pilar no banzo do pilar. No Quadro 3 estão apresentados o número de ensaios realizados e as características do modelo ensaiado.

Quadro 2: Características das ligações.

	Grupo	Tipo de Ligação	Nº de Ensaios	Viga	Pilar	Parafusos	Espessura da Chapa (mm)
Ligação Simples	1	Chapa de Extremidade Rasa	4	254x102x22 UB (S275)	152x152x23 UC (S275)	6 x M16 (Classe 8.8)	8
	2	Chapa de Extremidade Rasa	4	356x171x51 UB (S355)	254x254x89 UC (S355)	8xM20 (Classe 8.8)	10
	3	Chapa de Extremidade Flexível	3	356x171x51 UB (S355)	254x254x89 UC (S355)	8xM20 (Classe 8.8)	8
Ligação Mista	4	Chapa de Extremidade Flexível	4	356x171x51 UB (S355)	254x254x89 UC (S355)	8xM20 (Classe 8.8)	8
	5	Chapa de Extremidade Flexível	3	610x229x101 UB (S275)	305x305x137 UC (S275)	14xM20 (Classe 8.8)	10

Quadro 3: Carregamentos aplicados nos ensaios.

Grupo	Momento (KNm)
1	M1 = 4; M2 = 8; M3 = 13; M4 = 17
2	M1 = 27; M2 = 56; M3 = 82; M4 = 110
3	M1 = 8; M2 = 16; M3 = 40
4	M1 = 34; M2 = 46; M3 = 62; M4 = 82
5	M1 = 47; M2 = 80; M3 = 134; M4 = 180

Após a realização dos ensaios foi possível verificar que nos grupos 1, 2 e 3, não há diferenças significativas das temperaturas dos distintos elementos. Nos grupos 4 e 5 (ligação mista) registaram-se diferentes temperaturas nos elementos. Junto da laje, as temperaturas eram bastante inferiores às dos elementos mais afastados desta e, comparando os valores das temperaturas, verifica-se uma redução na ordem dos 20% a 30%. Lawson já havia verificado este fenómeno, a ação da laje de betão como dissipador de calor e uma barreira para a radiação, contribui para um melhor desempenho da ligação. Nos diferentes grupos analisados, foi possível verificar que os modos de rotura de cada uma eram diferentes. No grupo 1, verifica-se que ocorreu uma deformação no topo chapa, essencialmente em torno dos parafusos superiores, o pilar também apresentou deformações no banzo, e a alma apresenta sinais de encurvadura. No grupo 2, à semelhança do grupo 1, também apresentou deformações no topo da chapa, verificou-se o escorregamento dos parafusos na zona de tração, fenómeno que se deve à fusão das nervuras dos mesmos. Nos ensaios onde foram aplicados os carregamentos mais elevados, foi possível verificar uma linha de rotura ao longo da soldadura, na alma e banzo superior da viga.

No grupo 3, a chapa de extremidade apresentou deformações de tal ordem que o banzo inferior da viga ficou em contacto com o banzo do pilar. Nos grupos 4 e 5 a laje separou-se da viga, fenómeno que não deve ocorrer em situações de incêndio real, neste caso, as reduzidas dimensões da laje e o reduzido número de conectores, foram provavelmente a causa da separação laje – viga. Após o colapso da laje, a degradação da resistência da ligação dá-se de uma forma rápida, acabando por colapsar devido à rotura da chapa de extremidade.

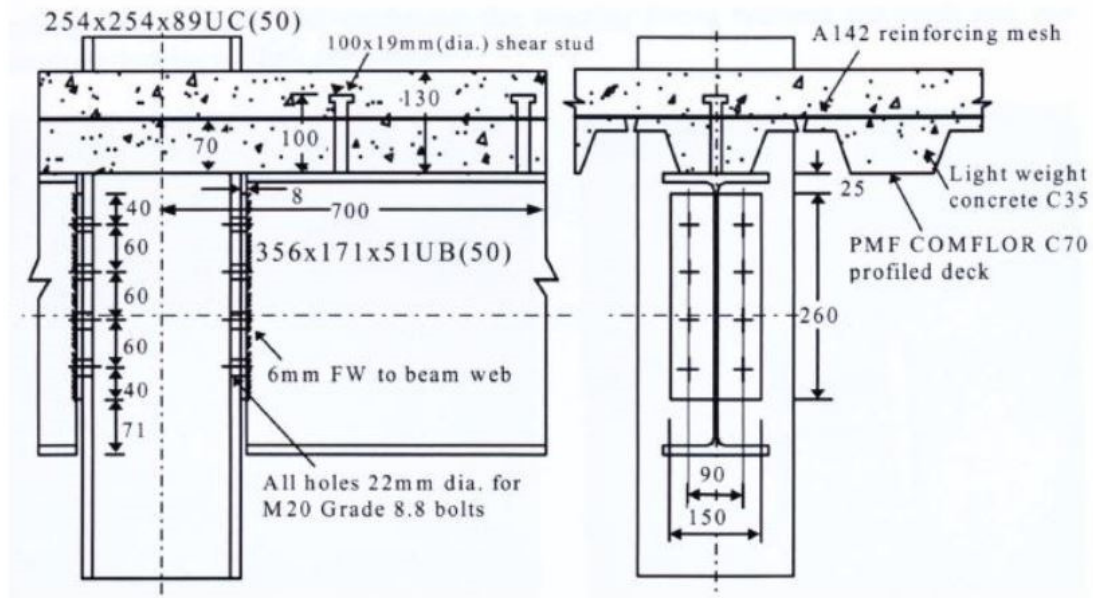


Figura 9: Modelo de ligação mista com chapa flexível.

## 2.6. 1998

Em Manchester e Sheffield, nas respetivas universidades, foram desenvolvidos ensaios de um programa de investigação conduzido por Allam. O estudo tinha como objetivo avaliar o efeito da restrição à dilatação térmica de vigas não protegidas, conferido por pilares protegidos, e pelas vigas adjacentes, estas últimas encontrando-se à temperatura ambiente (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002). Pretendia-se também avaliar qual a influência dos diferentes tipos de ligação no seu colapso, quando sujeitas a temperaturas elevadas e diferentes carregamentos. Neste estudo, foi incluída uma componente numérica e os resultados obtidos quer na componente numérica, quer na experimental, foram posteriormente comparados com os resultados obtidos no ensaio no edifício de Cardington (1995-1996). Foram realizados vinte e cinco ensaios em estruturas de aço bidimensionais e foram utilizados dois tipos de ligação: chapa rasa de extremidade e dupla cantoneira de alma. Ainda foram usados 3 níveis de carregamento 20%, 50% e 70% do momento resistente das vigas, ao nível da rigidez também foram criados 3 níveis de restrição horizontal, com recurso a molas com rigidez de 8 KN/m, 32KN/m e 64 KN/m. As estruturas ensaiadas eram construídas com pilar 152x152x30UC e viga 178x102x19UB, e os ensaios assentam numa análise bidimensional como mostra a Figura 10 e Figura 11.

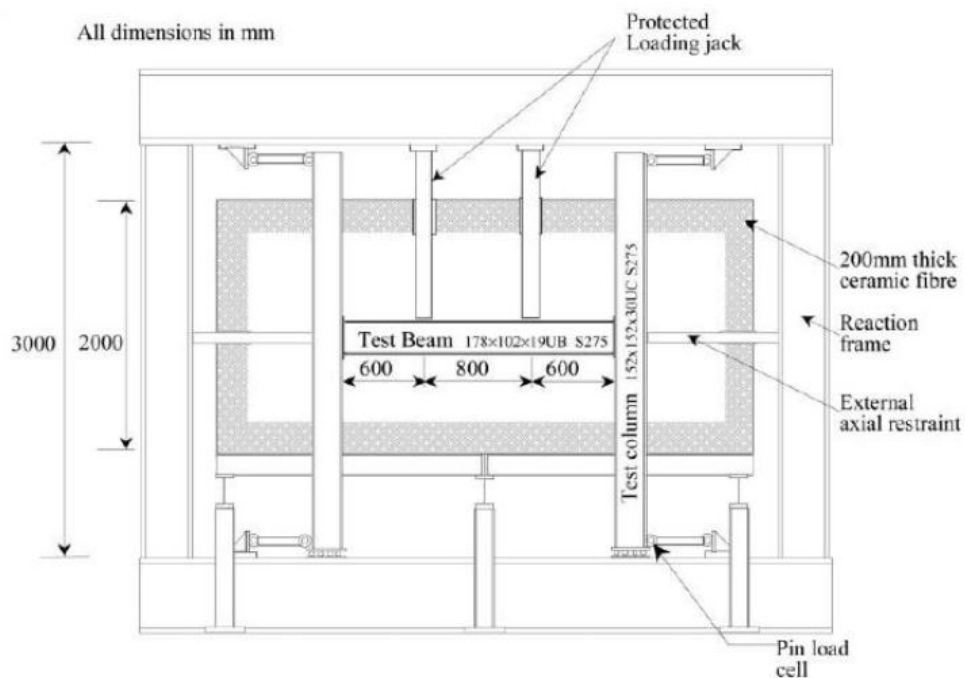


Figura 10: Vista em alçado da configuração dos ensaios (LIU, FAHAD, & DAVIES, 2002).

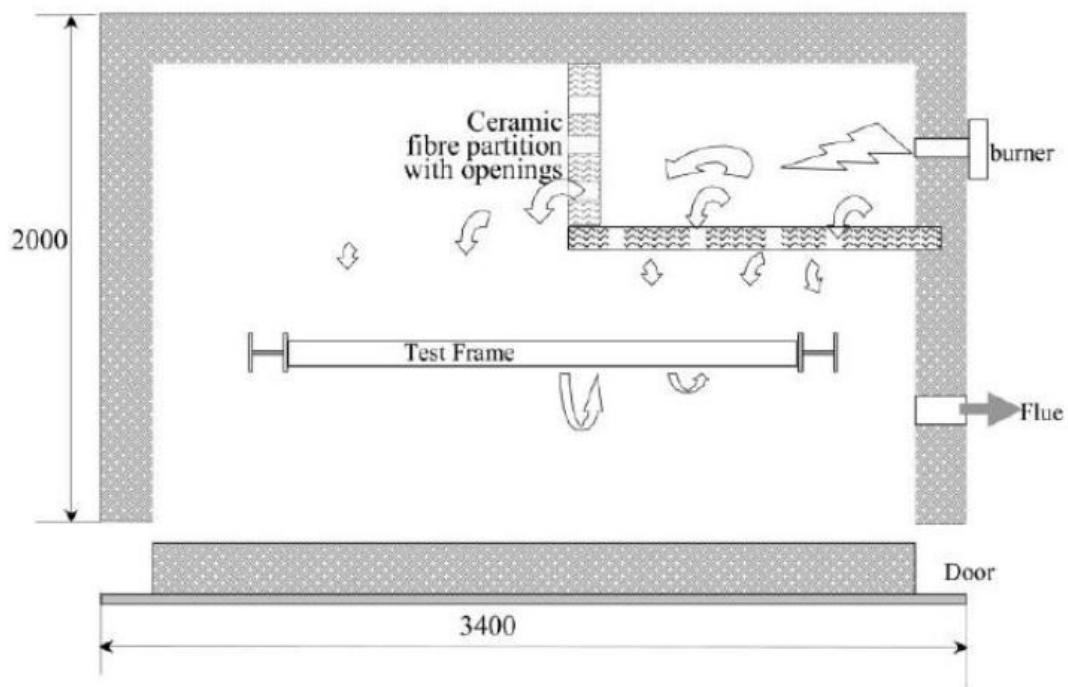


Figura 11: Vista em planta da configuração dos ensaios (LIU, FAHAD, & DAVIES, 2002).

Em estruturas metálicas a ocorrência de deformações elevadas nos seus elementos, antecede o colapso da estrutura. A análise deste estudo sugere que no caso das vigas restringidas axialmente, as deformações ocorridas podem ser muito superiores aos valores limite recomendados nas mais variadas normas, sem que estas deformações possam comprometer a integridade da estrutura. Tal conclusão deve-se ao facto de as deformações ocorridas serem provenientes da expansão térmica, e uma vez restringida, não se podem alongar axialmente (ver Figura 12)

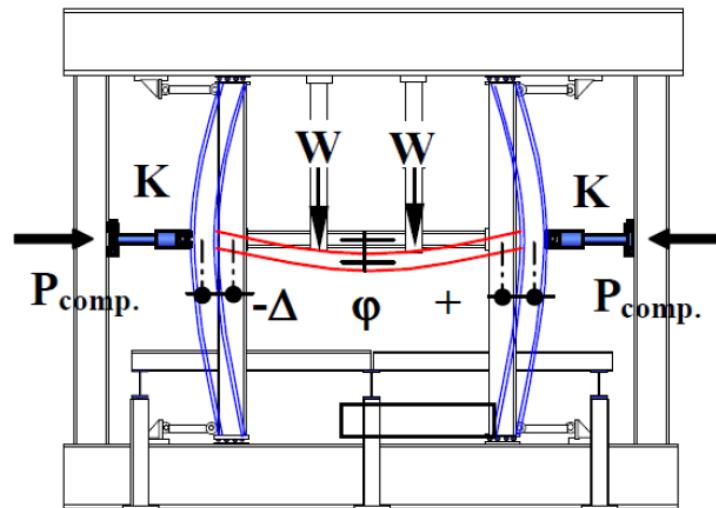


Figura 12: Expansão térmica da viga (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002).

Na fase mais avançada de um incêndio, a viga comporta-se como um cabo suspenso, tomando a forma de uma catenária. Após atingir este estado, as deformações que possam ocorrer são irrelevantes.

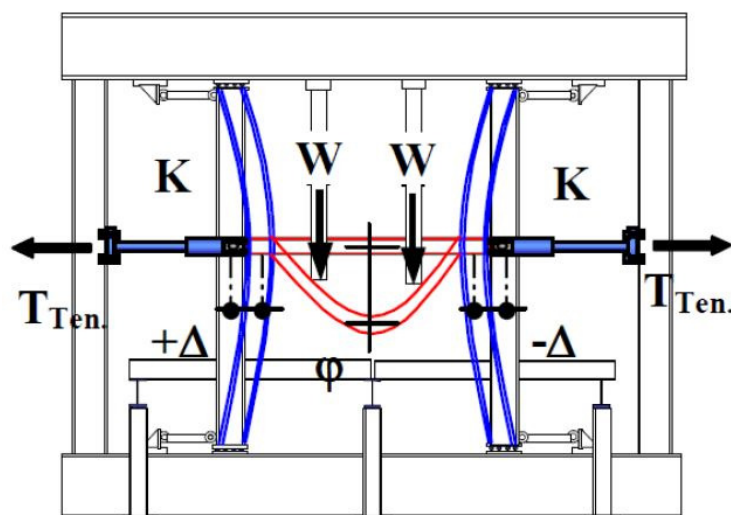


Figura 13: Viga em Catenária (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002).

O comportamento de uma viga restringida axialmente, sujeita a temperaturas elevadas, pode ser bastante influenciado pelo grau de restrição. Quanto maior a rigidez axial, maior será a capacidade para evitar o colapso na ocorrência de deformações inferiores. Numa fase inicial de incêndio, a estrutura circundante oferece muita resistência a expansão da viga. A deformação inicial provocada pelo efeito da expansão térmica que é restringida axialmente, está sujeita a um aquecimento mais rápido na zona inferior, que provoca um alongamento maior das fibras que compõem essa zona.

Dependendo do carregamento a que está sujeita, uma viga pode atingir grandes deformações a partir dos 350°C, uma vez que após atingir esta temperatura, o aço diminui substancialmente a sua rigidez e, quando a viga passa para o efeito catenária, leva a uma redistribuição de esforços da estrutura. O carregamento aplicado, as condições de fronteira, as propriedades dos materiais e a distribuição da temperatura, nos diferentes elementos de uma estrutura, influenciam o estado de tensão de uma viga que esteja simultaneamente em estado de catenária e com uma variação diferencial de temperatura.

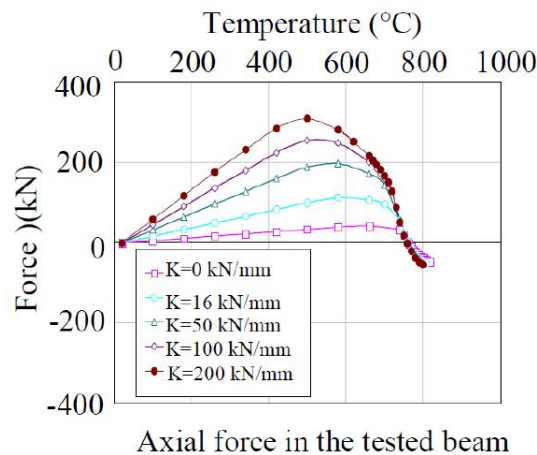


Figura 14: Curvas temperatura-compressão axial para diferentes graus de rigidez (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002).

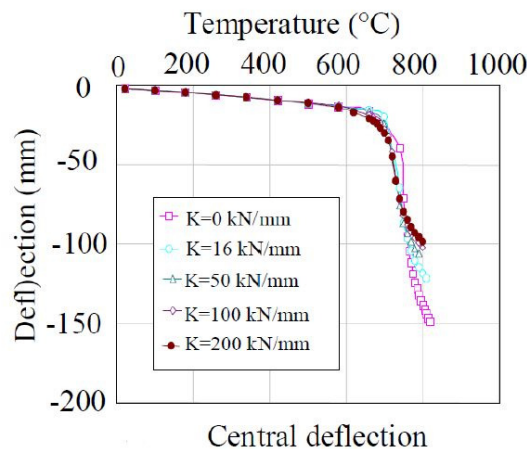


Figura 15: Curvas temperatura-deformação para diferentes graus de rigidez (ALLAM, BURGESS, & PLANK, 2002).

Na Figura 15, é possível verificar que a viga resiste até aos 700°C sem ocorrerem deformações relevantes provocadas pela ação do seu estado de catenária. Na Figura 14, verifica-se que a viga devido à sua expansão axial, passa por estado de compressão até aproximadamente aos 500°C, diminuindo gradualmente após este pico, isto porque a partir deste ponto a viga começa a ficar em suspensão. Concluímos que a viga só fica sujeita a esforços de tração após atingir os 700°C, uma vez que fica a funcionar como um cabo suspenso.

## **2.7. Métodos dos Elementos Finitos**

A utilização dos MEF, tem vindo a ganhar cada vez mais importância nas comunidades de investigação, possibilitando uma análise mais detalhada que outros métodos, inclusive, os ensaios experimentais.

Neste subcapítulo é apresentada a evolução cronológica dos desenvolvimentos neste método de análise.

### **2.8. 1996 - 1998**

Liu desenvolveu o primeiro modelo de elementos finitos para simular o comportamento de ligações sujeitas a temperaturas elevadas (LIU T. , Finite element modelling of behaviour of steel beams and connections in fire, 1996). O referido autor desenvolveu um programa de elementos finitos (FEAST), que permite modelar diferentes tipos de ligação. Para o desenvolvimento deste estudo foram analisadas chapas de extremidade rasa e estendida, considerando que as ligações à temperatura ambiente têm um comportamento entre rígido e semi-rígido. O objetivo do estudo era avaliar a influência de diversos parâmetros, como tamanho e números de parafusos e a espessura da chapa de extremidade.



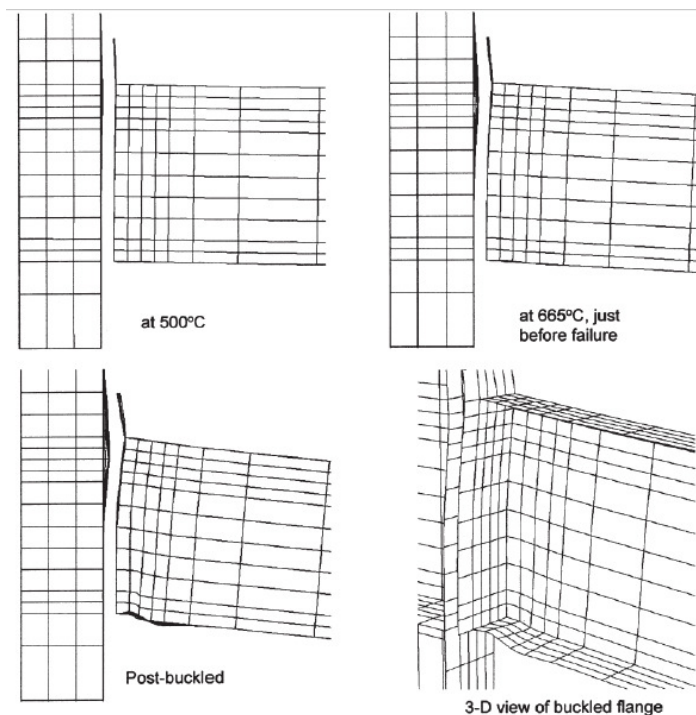


Figura 16: Evolução da deformação do banzo do pilar (LIU T. , Fire resistance of unprotected steel beams with moment connections, 1999).

Após a análise aos resultados obtidos, pode concluir-se que independentemente da sua capacidade resistente à temperatura ambiente, uma ligação quando sujeita a temperaturas elevadas, fica com sensivelmente dois terços da sua capacidade resistente. Para carregamentos semelhantes, as vigas com chapa de extremidade rasa apresentam aproximadamente a mesma capacidade de resistência ao fogo que teriam se estivessem simplesmente apoiadas. No caso das vigas com chapa de extremidade extendida, apresentam um comportamento melhor a temperaturas elevadas, a temperatura limite desta solução é de aproximadamente 50°C superior à de uma viga simplesmente apoiada.

## 2.9. 2004

Rahman, desenvolveu um modelo 3D que possibilitasse compreender melhor a resposta de ligações rotuladas em situação de incêndio. Com recurso ao programa ANSYS, foi modelada uma ligação com chapa de *gousset*, que transmite esforços de corte e confere continuidade entre a viga e o pilar (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004). Antes da ocorrência do acidente do *World Trade Center*, pensava-se que este tipo de solução oferecia alguma resistência à rotação que, através dos esforços de flexão, reduziam o momento a meio vão das vigas. No entanto, após a análise dos destroços dos edifícios do WTC, verificou-se que os danos provocados pela ação da temperatura nas ligações, foram a causa do colapso estrutural do edifício 5.

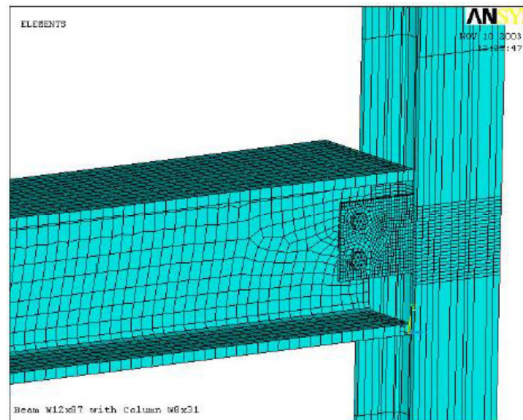


Figura 17: Modelação em elementos finitos da ligação com chapa de gousset (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

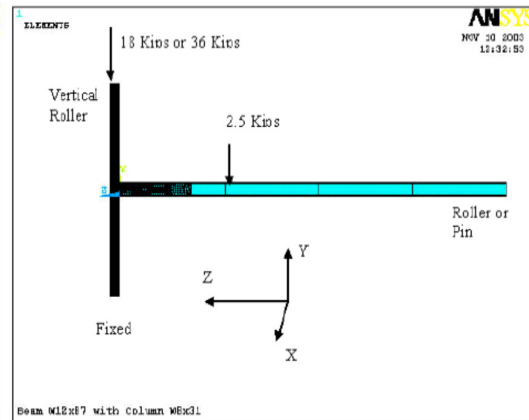


Figura 18: Carregamento e condições de fronteira da ligação com chapa de gousset (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

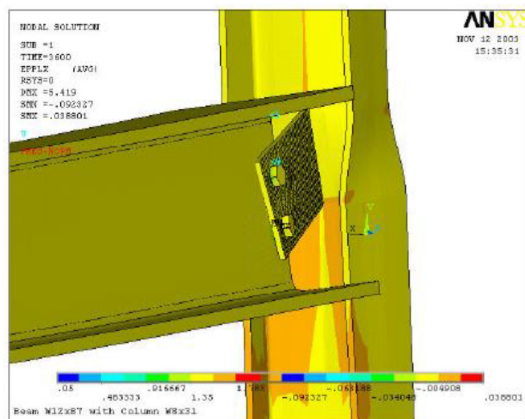


Figura 19: Diagrama de deformação plástica da ligação na direção x (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

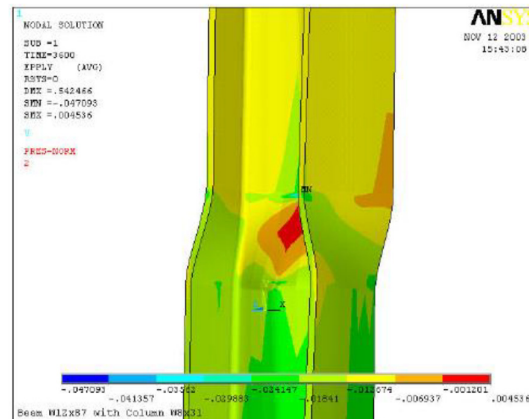


Figura 20: Diagrama de deformação plástica do pilar na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

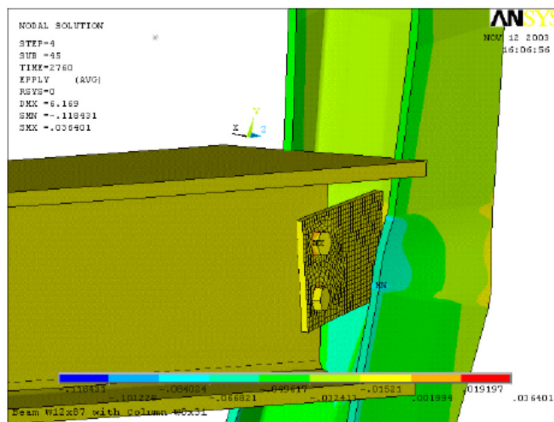


Figura 21: Diagrama de deformação plástica da ligação na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

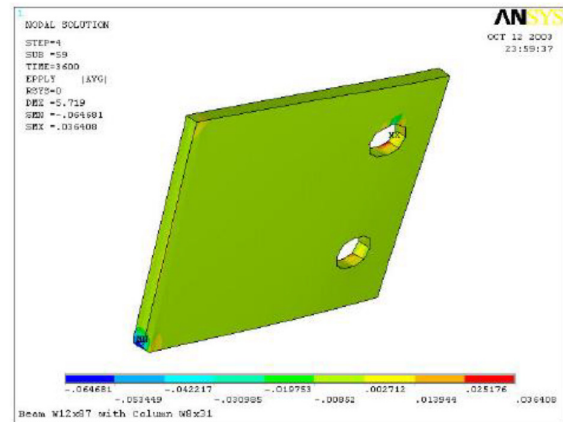


Figura 22: Diagrama de deformação da chapa de gousset na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

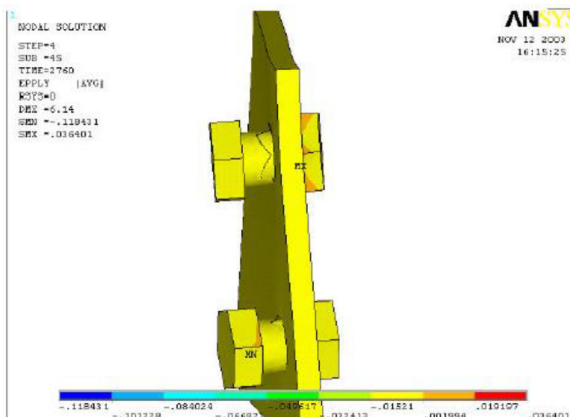


Figura 23: Diagrama de deformação da ligação na direção y (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

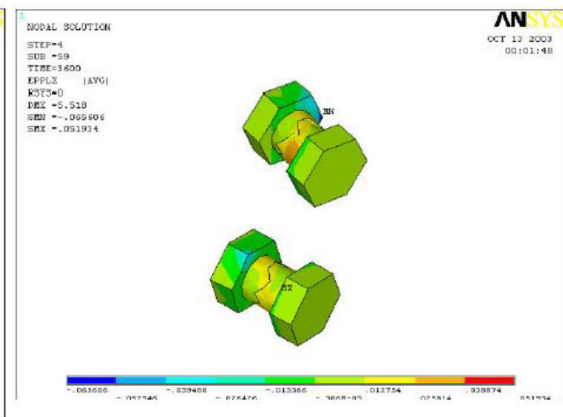


Figura 24: Diagrama de deformação dos parafusos na direção x (RAHMAN, HAWILEH, & MAHAMID, 2004).

Na Figura 17 e Figura 18 estão representados o modelo 3D e o carregamento utilizado neste estudo, respectivamente. Da Figura 19 à Figura 24, estão representados os diagramas de deformação dos diferentes elementos que constituem a ligação.

Na Figura 19 e Figura 21 é visível a deformação da alma e banzos do pilar, na Figura 21 verifica-se que existe deformação no canto da chapa, bem como na Figura 22 a ocorrência de torção (estas deformações devem-se à expansão axial da viga). Os esforços de corte ocorridos nos parafusos também são visíveis na Figura 24.

Os resultados obtidos vão ao encontro dos resultados alcançados através de ensaios experimentais, e também do que foi possível observar no edifício WTC5.

## 2.10. 2007

A necessidade de perceber melhor as ligações recorrendo à chapa de *Gousset*, levou Sarraj, a desenvolver um modelo de MEF (SARRAJ, 2007), com recurso ao *software* ABAQUS. A constituição modelo em estudo teve várias fases, até se chegar à sua versão final composto por três parafusos que ligavam a viga à chapa de *gousset* que, por sua vez, era soldada ao pilar. Inicialmente foi construído um modelo composto por um único parafuso sujeito a esforços de corte através de uma chapa (Figura 25-a) posteriormente, o modelo foi alterado para duas chapas e um parafuso (Figura 25-b) e, por fim, foi construído o modelo final (Figura 25-c). Para o estudo foi adotada uma malha refinada na zona dos parafusos, com o objetivo de obter resultado mais precisos e foi tido em conta o atrito entre superfícies com um coeficiente de  $\mu = 0.2$  para todas as superfícies de contato (Figura 26). Como o objetivo da análise recaía sobre a chapa de *gousset*, o banzo do pilar foi considerado como um elemento rígido. A carga foi aplicada lentamente para que não surgissem irregularidades entre elementos das superfícies de contacto.

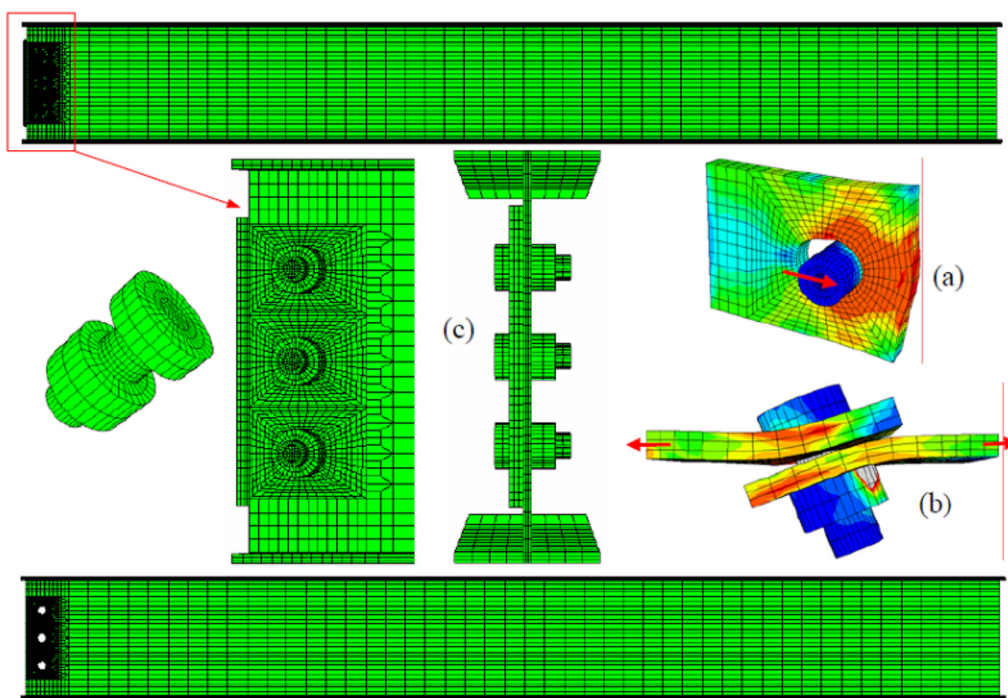


Figura 25: Composição dos modelos estudados (SARRAJ, 2007).

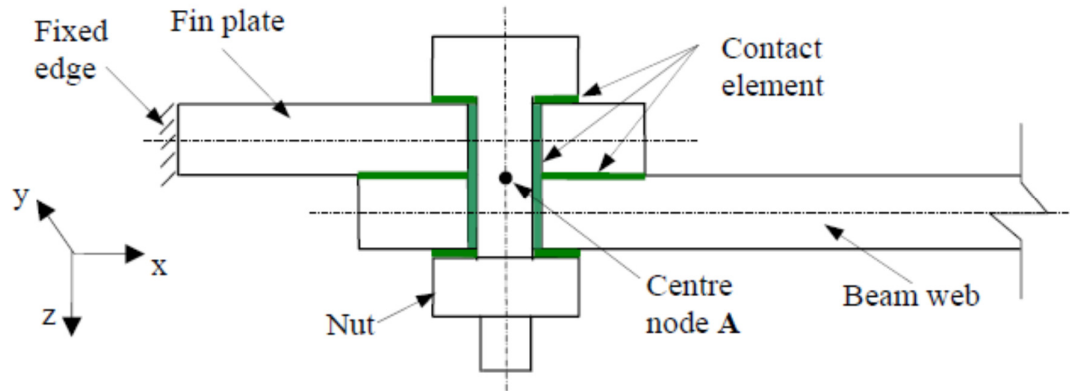


Figura 26: Superfícies de contacto (SARRAJ, 2007).

Só após a realização de ensaios experimentais, primeiro à temperatura ambiente e, posteriormente, a temperaturas elevadas, é que os resultados obtidos na análise do modelo foram validados. Analisando as deformações ocorridas (Figura 27), conclui-se que a ligação roda em torno do parafuso intermédio, o que provoca no furo superior uma deformação acentuada na direção da extremidade da viga e, no furo inferior, uma deformação na direção do interior da alma. Quer nos ensaios experimentais quer na análise com MEF, é possível apresentar os resultados em forma de gráfico pelo que, na Figura 28, é apresentado um gráfico onde os resultados da correlação momento-rotação do ensaio experimental é comparado ao obtido com recurso ao ABAQUS à temperatura ambiente.

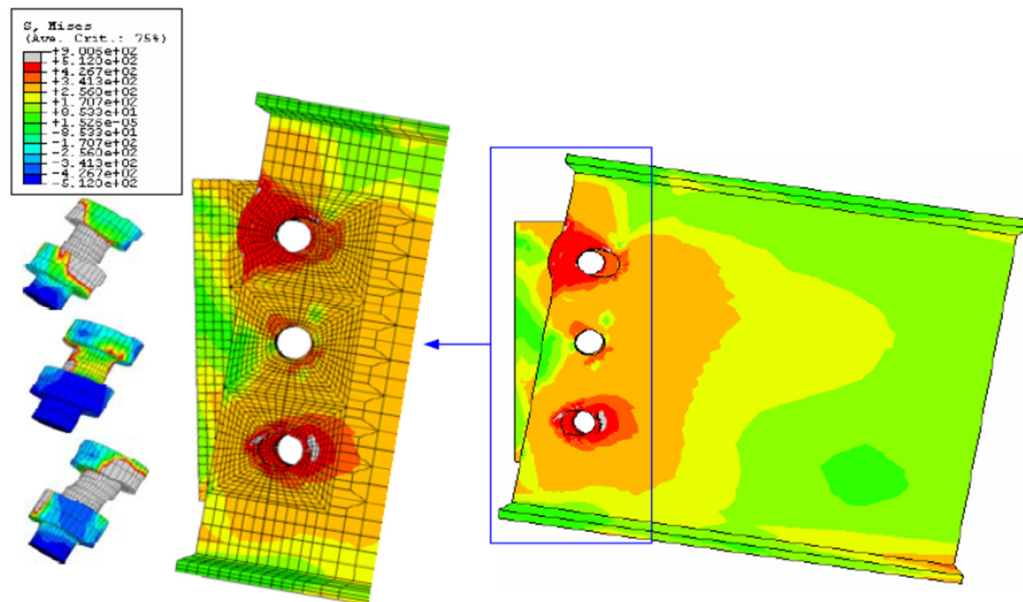


Figura 27: Tensão de Von Mises na Ligação em Estudo (SARRAJ, 2007).



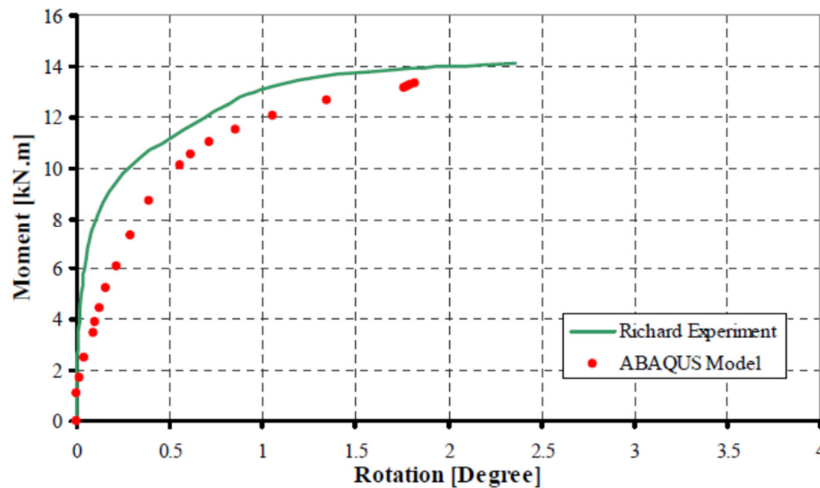


Figura 28: Curvas momento-rotação à temperatura ambiente do modelo Sarraj e dos ensaios de Richard (SARRAJ, 2007).

Os resultados do modelo foram apenas parcialmente validados, isto porque existe escassez de dados relativos a ligações com chapas de *gousset*. Sarraj, desenvolveu assim um modelo isolado da viga, para comparar os resultados obtidos com os dos ensaios experimentais desenvolvidos por El-Rimawi (BURGESS, EL-RIMAWI, & PLANK, 1991), o modelo apresenta as mesmas dimensões e carregamento utilizados nos ensaios experimentais. A Figura 29 representa a variação de temperatura aplicada à viga, também ela semelhante à utilizada nos ensaios experimentais. Na Figura 30, é possível analisar a correlação entre deslocamento (a meio vão) obtido no modelo de Sarraj e de outros autores, onde se incluem os resultados obtidos nos ensaios de El-Rimawi.

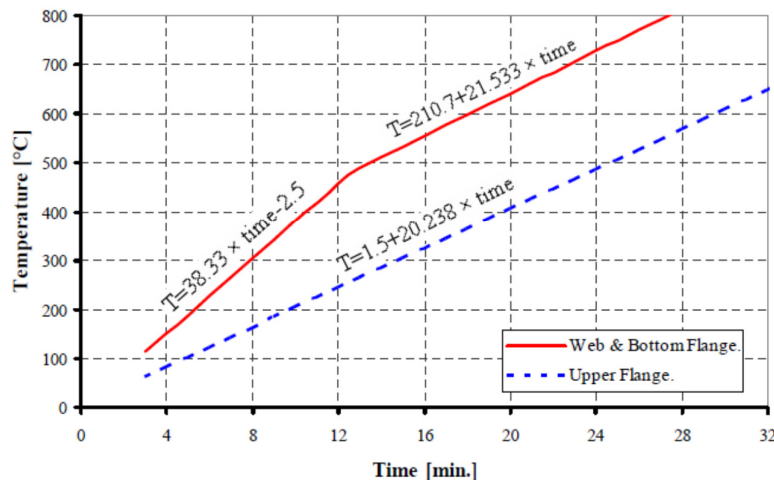


Figura 29: Curvas da temperatura na alma e no banzo inferior da viga (a vermelho) e no banzo superior da viga (a tracejado azul) em função do tempo decorrido (SARRAJ, 2007).

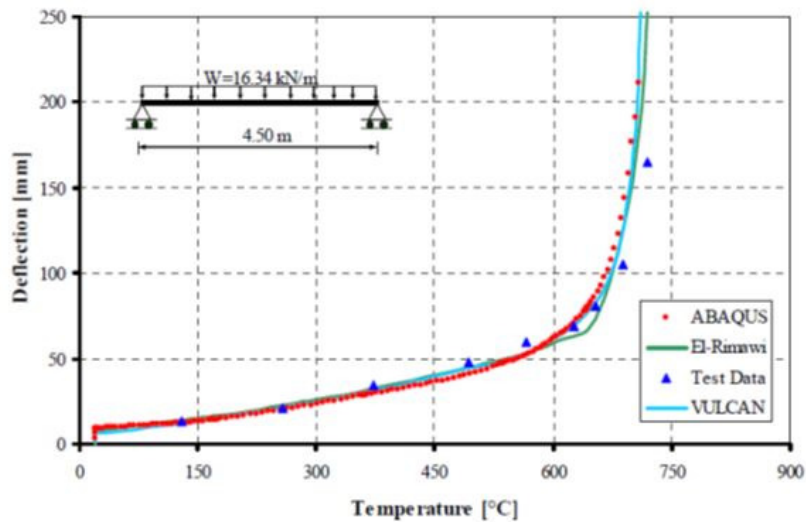


Figura 30: Curvas deslocamento (a meio vão) -temperatura (SARRAJ, 2007).

Foi ainda elaborado por Sarraj um terceiro modelo, para reproduzir as condições dos ensaios levados a cabo por Wald (WALD, 2006). A curva de temperatura é semelhante à utilizada nos ensaios de Cardington (ensaios à escala global), quer em fase de aquecimento quer na fase de arrefecimento. Para o modelo foram considerados os seguintes elementos: chapa de *gousset* de três furos – 6x60x125mm (S235); viga – IPE160 (S235); parafusos – 12mm (8.8). Uma vez que se tratam de elementos simétricos, foi apenas reproduzida metade da configuração real dos elementos Figura 31.

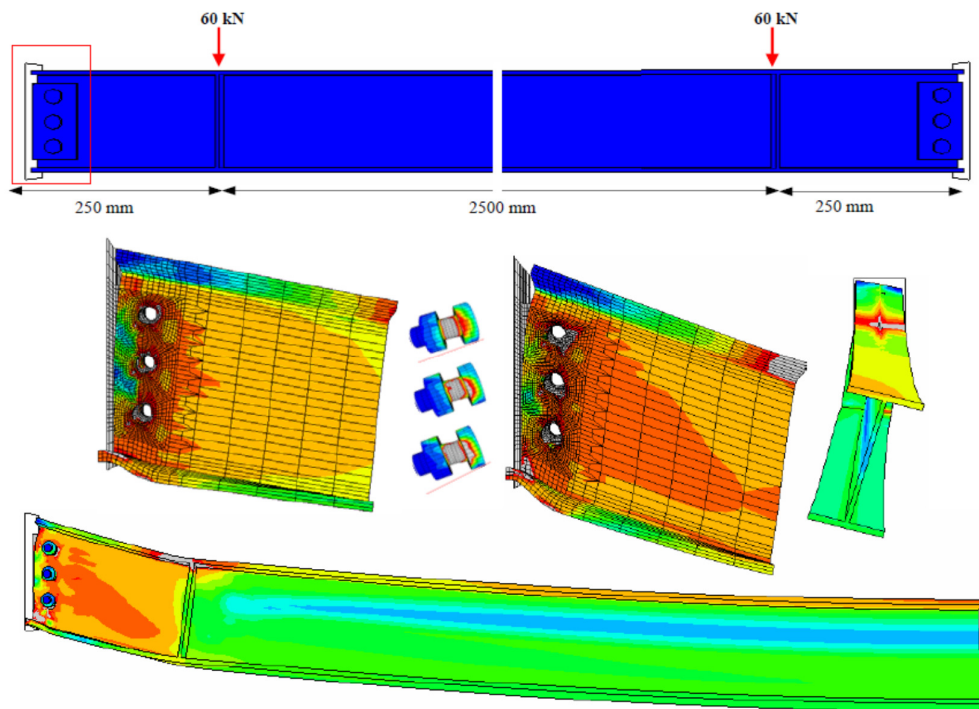


Figura 31: Deformações do Modelo de elementos finitos tendo em conta a simetria (SARRAJ, 2007).

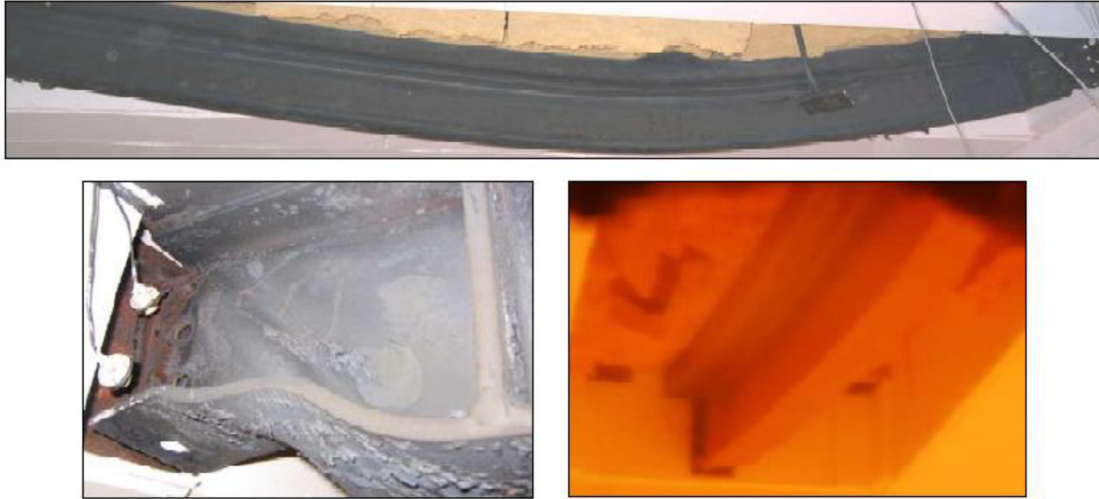


Figura 32: Deformação da viga e da ligação nos ensaios de Wald (SARRAJ, 2007).

Após a análise dos resultados obtidos, verifica-se que estão bastante próximos dos resultados adquiridos pelos ensaios experimentais (Figura 33). Os resultados obtidos através do modelo revelam-se mais conservativos, à medida que a temperatura aumenta, principalmente a partir dos 20 minutos. Deste modo, fica uma vez mais demonstrada a mais-valia que são os MEF no estudo de ligações sujeitas a temperaturas elevadas.

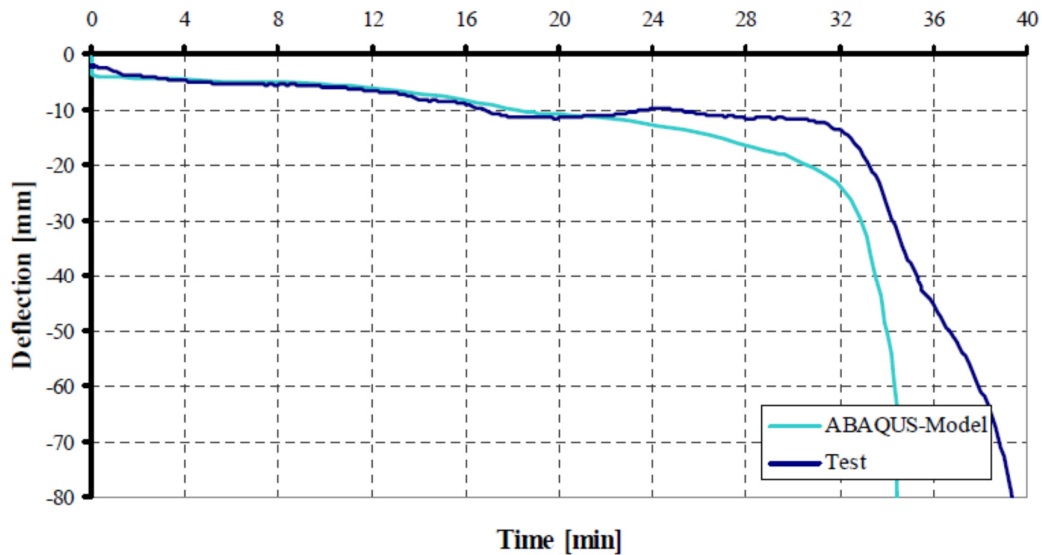


Figura 33: Curvas tempo-deformação (no ponto de aplicação da carga) dos ensaios de Wald *et al.* e do modelo de Sarraj *et al.* (SARRAJ, 2007).



### 2.11. 2007

Al-Jabri, também recorreu aos MEF para estudar ligações com chapa de extremidade quando sujeitas a temperaturas elevadas (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006), recorrendo ao programa ABAQUS. O objetivo do estudo era criar uma relação momento-rotação para vários carregamentos e várias temperaturas. O modelo utilizado foi modelado em 3D do tipo *brick*. No contacto entre superfícies foi considerada a lei de atrito de Coulomb, bem como as alterações ocorridas nos materiais ao longo da simulação obedeceram ao EC3-1-2, através da incorporação da diminuição da capacidade resistente e da rigidez dos materiais. As características geométricas dos materiais e os carregamentos efetuados foram idênticos aos utilizados nos ensaios experimentais por si conduzidos. Uma vez que os materiais apresentavam uma configuração geométrica, Al-Jabri reconstruiu apenas um quarto da configuração utilizada nos ensaios, possibilitando assim uma redução do tamanho dos modelos bem como a redução do tempo de análise, ainda assim, foi preciso restringir os pontos situados nos planos de simetria na direção perpendicular ao respetivo plano.

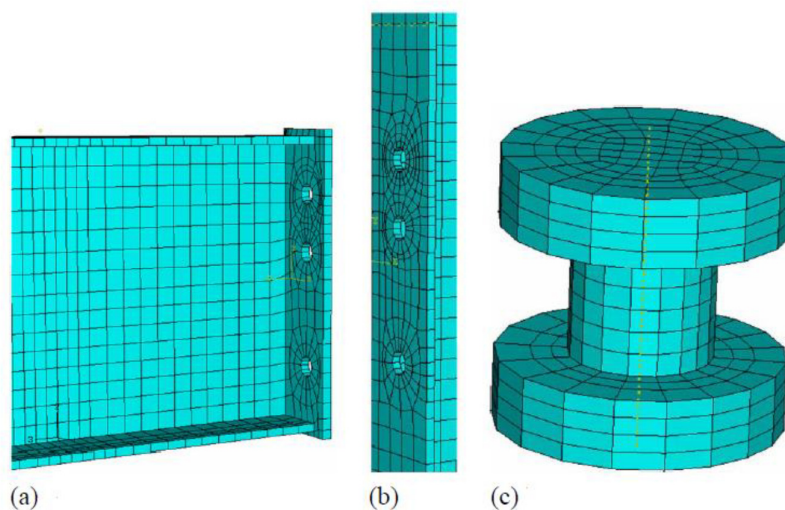


Figura 34: Modelo 3D da chapa de extremidade (a), do banzo do pilar (b) e dos parafusos (c) (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006).



Figura 35: Modo de rotura nos ensaios experimentais (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006).

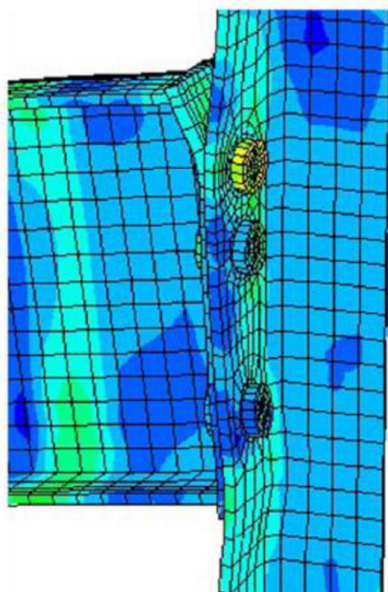


Figura 36: Modo de rotura no modelo de elementos finitos (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006).

Na Figura 34, estão representados os modelos 3D utilizados na construção do modelo estudado, na Figura 35 e na Figura 36 estão representados os modos de rotura do ensaio experimental e do modelo MEF, respetivamente. Após a visualização dos métodos de rotura dos dois estudos, facilmente se identificam semelhanças na deformação ocorrida nas duas situações. Devido aos esforços de tração, o banzo do pilar na zona do parafuso superior deforma-se na direção exterior do pilar, bem como também é visível que as forças de compressão provocam no banzo deformações na direção interior do pilar. Na Figura 37 é possível analisar os elementos constituintes do modelo isoladamente.

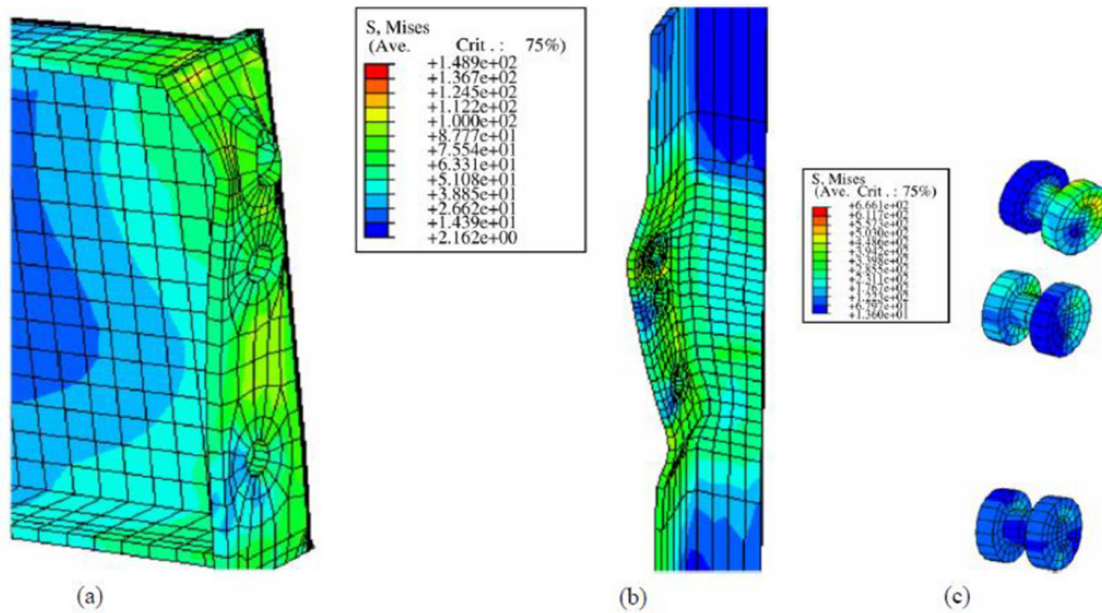


Figura 37: Deformação da chapa de extremidade (a), do banço do pilar (b) e dos parafusos (c) (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006).

A partir das curvas momento-rotação e temperatura-rotação, foi possível comparar os resultados obtidos no modelo de elementos finitos com os obtidos nos ensaios experimentais (Figura 38 e Figura 39).

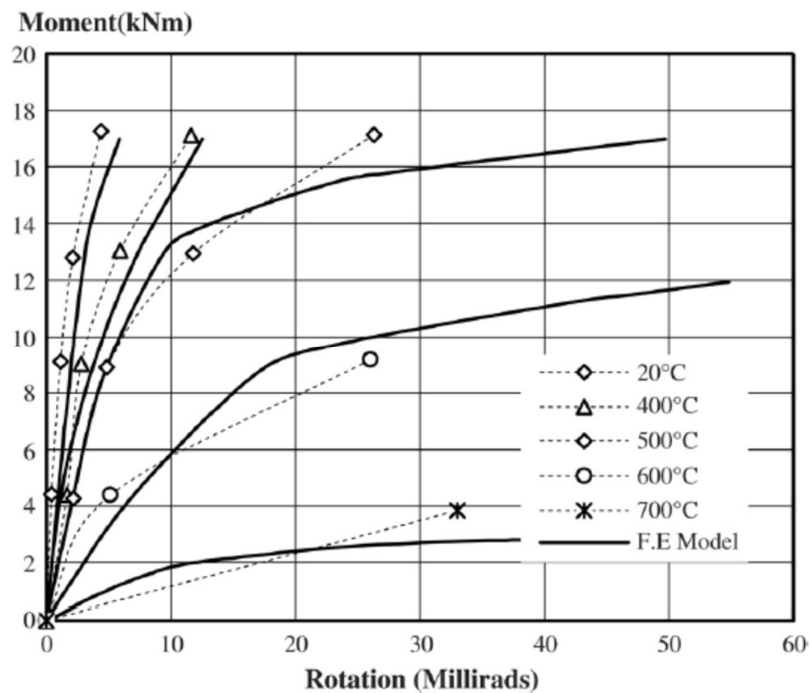


Figura 38: Curvas momento-rotação-temperatura dos ensaios experimentais e do modelo de EF (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006).

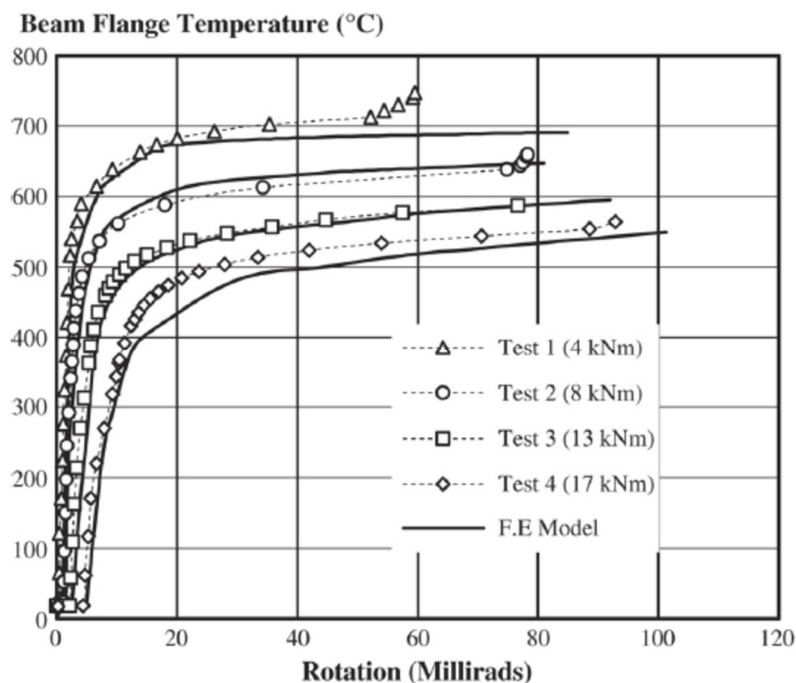


Figura 39: Curvas temperatura-rotação dos ensaios experimentais e do modelo de EF para diversos carregamentos (AL-JABRI, SEIBI, & KARRECH, 2006).

A observação das curvas confirma a aproximação de resultados obtidos entre o ensaio experimental e o modelo de elementos finitos, o que faz dos MEF uma ferramenta cada vez mais válida para simular o comportamento de ligações a temperaturas elevadas.

## 2.12. 2014

Inserido no projeto europeu RFCS ROBUSTEFIRE, e no projeto Nacional IMPACTFIRE, Cécile Haremza desenvolveu a sua tese de doutoramento em construção metálica e mista. O trabalho foi desenvolvido com uma configuração estrutural de um edifício típico de parque de estacionamento aberto. Para o estudo foi considerado o colapso de um pilar devido a um incêndio localizado (combustão de veículos), e as restrições axiais devidas à estrutura não afetada pelo incêndio. Este trabalho teve como objetivo principal o estudo detalhado do comportamento de uma ligação mista aço-betão viga-pilar com placa de extremidade, aquecida pelo incêndio localizado, quando está sujeita a momentos flettores e esforços axiais variáveis.

Para o devido efeito foram feitos estudos experimentais, numéricos e analíticos:

- Ensaio experimentais em ligações mistas aço-betão viga-pilar sob diferentes combinações de momentos flettores e esforços axiais, considerando não só condições isotérmicas, mas também um cenário de temperatura transitória.

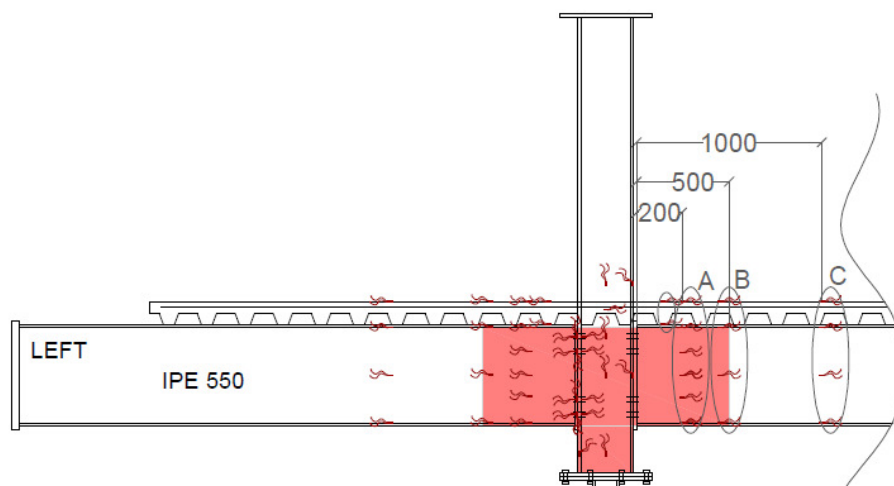


Figura 40- A rosa está representada a zona de aplicação da temperatura.

O principal objetivo dos ensaios experimentais era observar o efeito do momento fletor e das cargas axiais nas ligações viga-pilar e aço-betão, depois do colapso do pilar. Para o efeito foram testados sete modelos na Universidade de Coimbra: um teste à temperatura ambiente, cinco com temperaturas entre 500°C e 700°C e um sujeito ao aumento de temperatura até atingir o colapso do pilar.

Os seis primeiros testes representaram situações de referência “teóricas” que permitem compreender a influência de vários fatores que afetam a resposta da ligação e a sua capacidade de resistência e rotação; a sétima foi uma tentativa de reproduzir o carregamento real e comportamento da ligação. O efeito da restrição axial da viga proveniente da parte não afetada do edifício também foi estudado: três ensaios sem restrição axial; dois testes com restrição axial total; e dois testes com restrição axial mais que se aproximava mais a uma situação real.

Dos testes realizados sem restrição axial (testes 1, 2 e 3), o efeito das temperaturas observaram que a capacidade de rotação das ligações e a ductilidade aumentam com as temperaturas, 6% a 500°C e 97% a 700°C, enquanto o momento fletor máximo é reduzido em 20% a 500°C e 50% a 700°C.

Dos ensaios realizados com restrição axial total da viga (testes 4 e 5), observaram resistências de momento fletor mais altas, sem falha de parafuso. O aumento observado na capacidade de momento está de acordo com resultados experimentais e analíticos anteriores (Lima et al., 2004; Simões da Silva et al., 2004), resultantes do efeito benéfico das baixas forças axiais de compressão, que também levam a aumentar a capacidade de rotação da ligação. No entanto, esses efeitos benéficos só acontecem para valores pequenos de cargas axiais de compressão; cargas axiais compressivas mais altas diminuiriam a resistência do momento fletor da ligação.

O objetivo do teste de demonstração é mostrar o comportamento real da estrutura da ligação quando sujeito a um incêndio localizado que leva ao colapso do pilar. Quando o pilar inferior atinge 658°C, colapsa; além disso, quando atinge 700°C, o deslocamento vertical da ligação começa a aumentar mais rapidamente, então a laje é esmagada e, finalmente, a estrutura entra em colapso como representa a Figura 41.



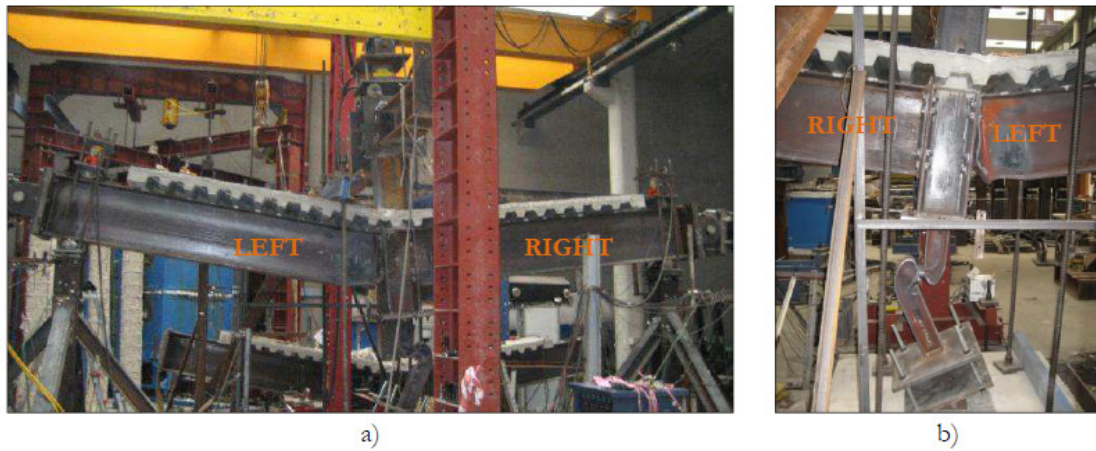


Figura 41- a) Deformações da estrutura, b) Detalhe do colapso do pilar inferior.

Por fim verificaram que a ação catenária não é alcançada em nenhum teste; a falha dos parafusos na linha inferior ocorre para pequenos deslocamentos verticais durante o desenvolvimento das cargas de compressão.

-Modelos numéricos 3D com recurso a análises MEF através do *software* Abaqus v6.12, foram desenvolvidos de forma a reproduzir os ensaios experimentais, como ilustra a Figura 42.

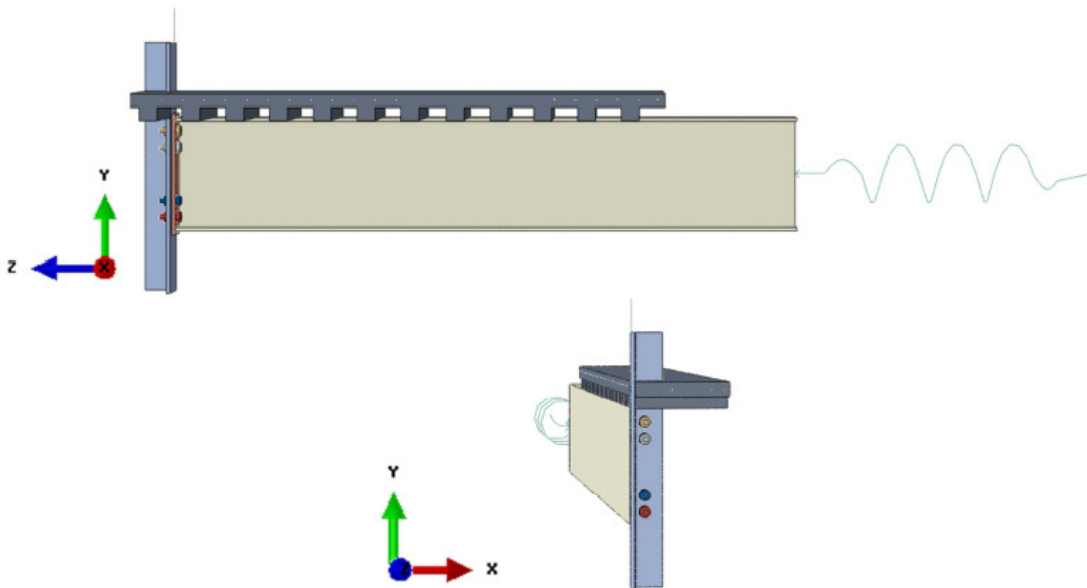


Figura 42 - Modelo utilizado no Abaqus v6.12.

O comportamento global da ligação aço-betão em Abaqus foi modelado com precisão, a falha da ligação é facilmente aproximada, as previsões precisas da deformação até à falha são fornecidas em temperaturas ambiente e elevadas. Esses modelos permitem avaliar o comportamento detalhado em todo o cenário de robustez, incluindo tensões, extensões, deformações.

No modelo do teste 6 (700°C e  $K_a = 50 \text{ kN/mm}$ ), aparecem algumas discrepâncias (Figura 43) para as cargas medidas no topo do pilar e na restrição axial da viga, e maior resistência no modelo de elementos finitos. Isto é justificado pelos efeitos de fluência que podem afetar a deformação da estrutura e as cargas de reação durante o teste experimental, principalmente para o teste 6, sujeito à influência das restrições axiais das vigas. Os efeitos de fluência não foram considerados nesta modelação mas devem ser considerados em desenvolvimentos posteriores.

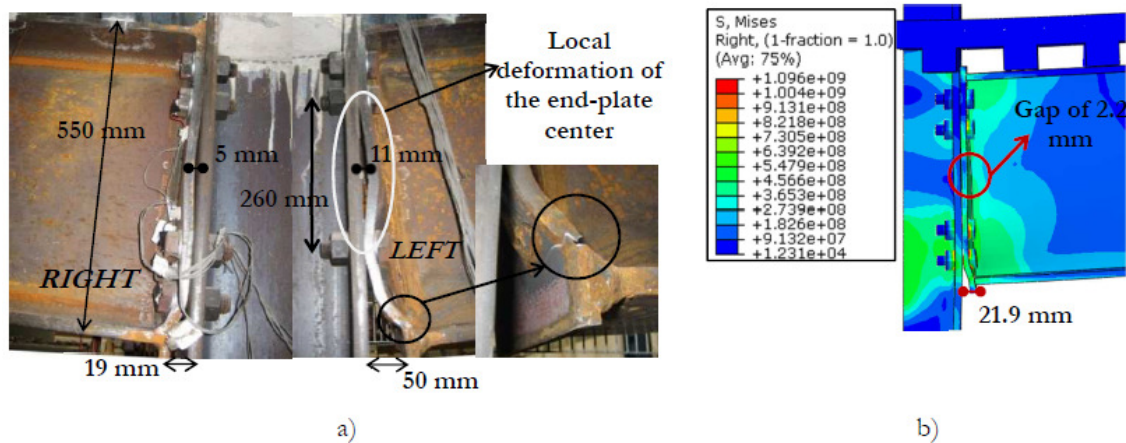


Figura 43- a) Deformações ocorridas no ensaio experimental; b) Deformações no modelo de elementos finitos.

### 3. COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES EM AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O aço é um material cada vez mais utilizado na construção uma vez que possui como vantagens leveza, resistência e ductilidade. Uma das principais desvantagens é a perda de rigidez e resistência quando está perante um aumento de temperatura, levando a uma deformação nos seus elementos.

#### 3.1. Propriedades mecânicas do aço

A curva de tensão-deformação, a temperaturas elevadas, é utilizada para determinar a resistência de elementos estruturais e está representada no Gráfico 1. Este gráfico é dividido por quatro zonas distintas. Na primeira observa-se a lei de *Hooke* limitada pela tensão limite de proporcionalidade. A segunda zona apresenta uma curva elíptica limitada pelo limite de elasticidade aparente correspondente ao início da flexão. Na terceira, a tensão é constante e igual ao limite de elasticidade, correspondendo à zona plástica. A quarta apresenta uma diminuição linear da tensão de cedência.

Os fatores de redução da relação tensão-deformação do aço, a temperaturas elevadas, são apresentados no Gráfico 2. Estes fatores são definidos da seguinte forma:

- Tensão de cedência, relativa à tensão de cedência a 20°C:  $k_y, \theta = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$ ;
- Tensão limite de proporcionalidade, relativa à tensão de cedência a 20°C:  $k_p, \theta = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}$ ;
- Módulo de elasticidade linear, relativo ao módulo de elasticidade a 20°C:  $k_E, \theta = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$ .

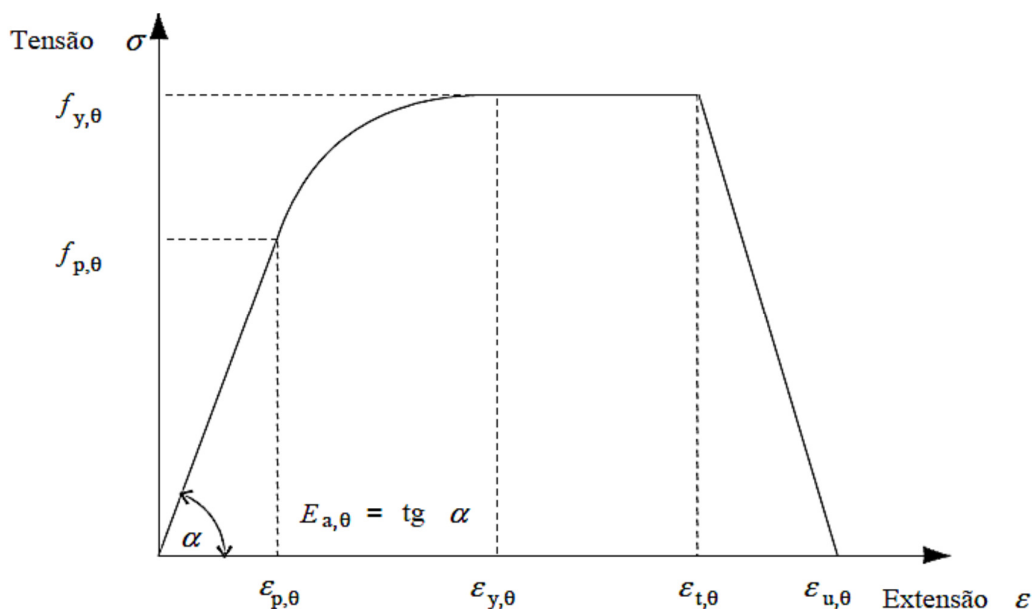


Gráfico 1: Curva tensão-deformação do aço a temperaturas elevadas (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010).



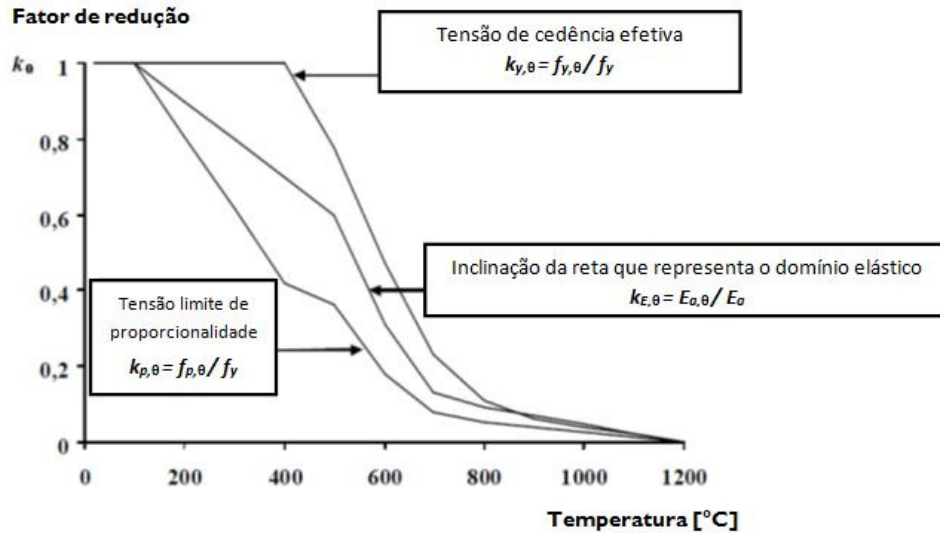


Gráfico 2: Fatores de redução para a relação de tensão-deformação do aço, a temperaturas elevadas (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010).

Quando a temperatura atinge os 400°C, o fator de redução  $k_{y,\theta}$  sofre um decréscimo abrupto. A tensão limite de proporcionalidade, relativa à tensão de cedência, diminui bruscamente após os 100°C pelo fator  $k_{p,\theta}$ . O módulo de *Young* é reduzido pelo fator de redução de  $k_{E,\theta}$ , que também sofre uma redução desde os 100°C, devido à relação com a tensão limite de proporcionalidade.

### 3.2. Propriedades térmicas do aço

As propriedades térmicas do aço são caracterizadas pela extensão térmica, determinada pela equação  $\frac{\Delta l}{l}$ , e pelo calor específico,  $c_a$ . Estas propriedades são definidas na norma, Eurocódigo 3-Parte1.2 (EN 1993-1-2:2010) de acordo com o Gráfico 3 e Gráfico 4, relativos à extensão térmica e ao calor específico, respetivamente.

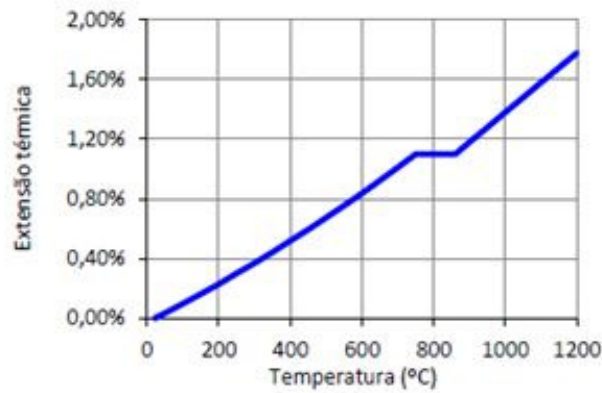


Gráfico 3: Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010).

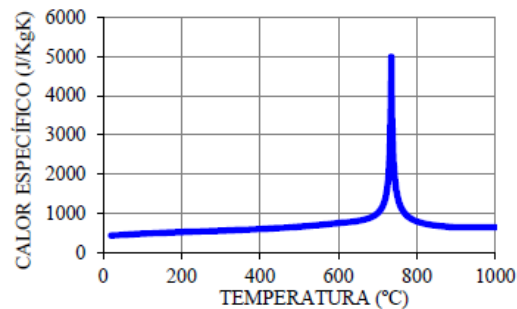


Gráfico 4: Calor específico do aço carbono em função da temperatura (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010).

A condutibilidade térmica do aço,  $\lambda_a$ , em função da temperatura, encontra-se representada no Gráfico 5.

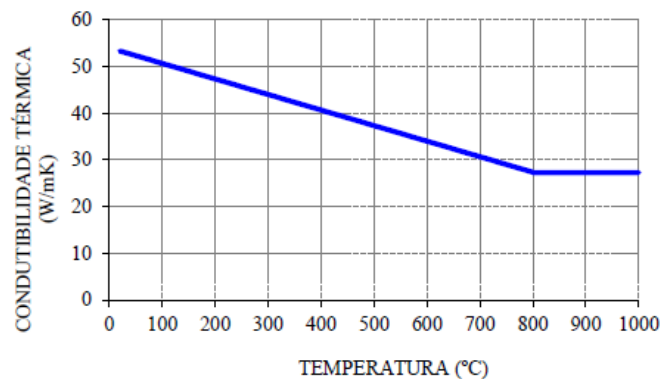


Gráfico 5: Condutibilidade térmica do aço carbono em função da temperatura (Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo, 2010).

### 3.3. Classificação das ligações em aço

As ligações em aço podem ser classificadas de acordo com parâmetros de rigidez, resistência ou capacidade de rotação.

A rigidez divide-se em três classes, rígidas, semi rígidas e articuladas. Uma ligação viga-pilar deve apresentar limiares intermédios de ligação. Na Figura 44 pode observar-se os diagramas de rigidez dos diferentes tipos de ligações.

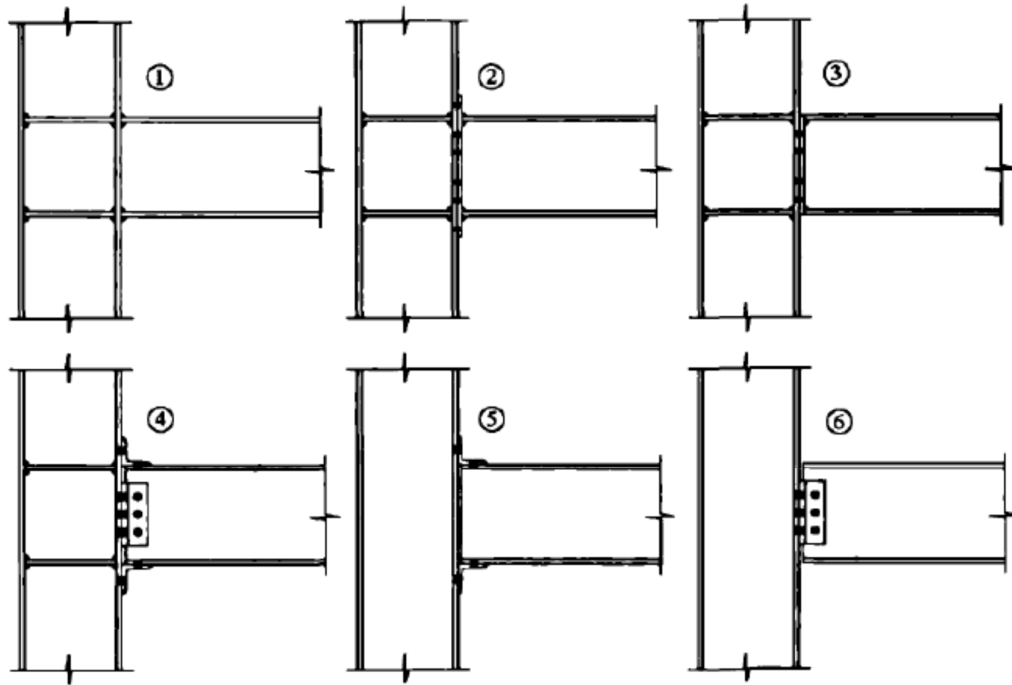


Figura 44: Ligações viga-pilar típicas (RESENDE, 2009).

1. Ligação com soldadura total
2. Ligação com chapa de extremidade estendida
3. Ligação com chapa de extremidade rasa
4. Ligação com cantoneiras de alma de base e de topo
5. Ligação com cantoneiras de base e de topo.
6. Ligação com cantoneiras de alma.

No que diz respeito à resistência, esta classifica-se consoante a capacidade resistente em relação ao momento resistente da viga. As ligações podem apresentar resistência total, parcial ou nula, de acordo com a Figura 45.

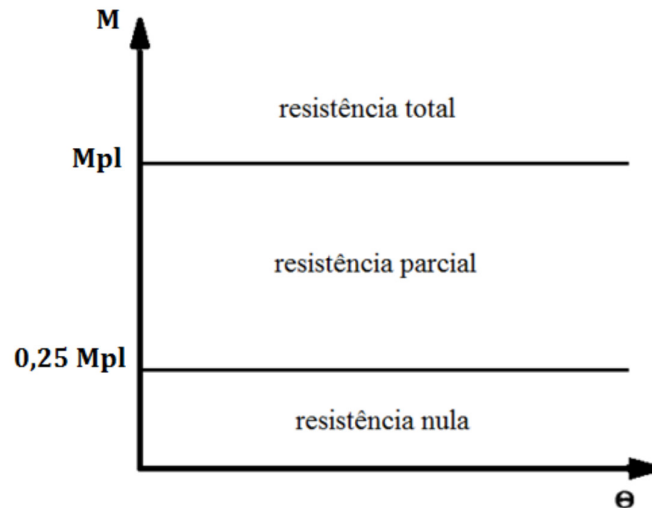


Figura 45: Classificação das ligações quanto à resistência (RESENDE, 2009).

Por último, a capacidade de rotação é a capacidade de uma ligação suportar rotações elevadas, para que o momento resistente desta, não desça abaixo do momento plástico. Um dos aspetos importantes é a ligação possuir capacidade de rotação suficiente para redistribuir os esforços pelos diferentes elementos. Quando as ligações são mais rígidas, a capacidade de rotação é baixa, o que pode implicar uma rotura precoce de alguns componentes da ligação.

### 3.4. 3.4 Método dos Componentes

Este método foi desenvolvido inicialmente por Tschemmerneegg para ligações à temperatura ambiente, com o objetivo de evitar a necessidade de recorrer a análises complexas não-lineares em elementos finitos para prever a resposta momento-rotação de ligações em aço.

O método é preconizado no EC3-1-8 [69] e consiste na simulação do comportamento da ligação através de um modelo dividido em componentes como ilustra a Figura 46. Os componentes são representados por molas, cuja rigidez é baseada nas suas propriedades materiais e geométricas. A rigidez global da ligação é calculada considerando a rigidez dos vários elementos que a compõem. Quando sujeitas a temperaturas elevadas, a resposta global de uma ligação é simulada considerando as características de cada elemento, determinadas através de ensaios experimentais. Sob a forma de uma relação temperatura-rigidez.

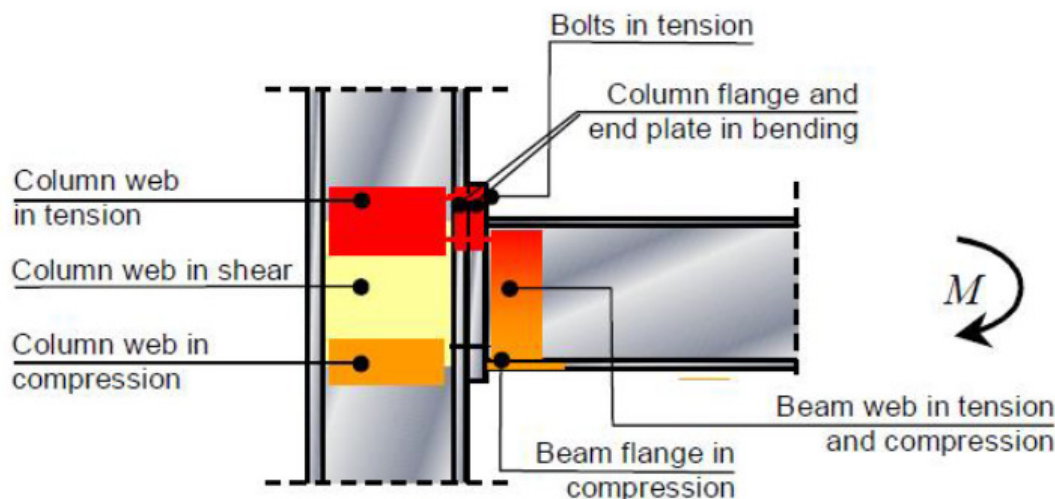


Figura 46- Modelo dividido em zonas de tração, compressão e corte.

#### 3.4.1 – Exemplo de um modelo desenvolvido pelo Método das Componentes

Leston-Jones é autor de um dos primeiros trabalhos desenvolvidos neste campo, realizou vários ensaios a elevadas temperaturas em ligações simples e mistas com chapa de extremidade rasa. Com base nestes ensaios e seguindo o recomendado no EC3-1-8, foi proposto um modelo de componentes para os dois tipos de ligação.

##### 3.4.1.1 – Ligação simples com Chapa de Extremidade Rasa

A proposta de Leston-Jones sugere que o comportamento de uma ligação a elevadas temperatura possa ser representado da mesma forma que à temperatura ambiente, desde que sejam introduzidas modificações necessárias para que se contabilizem as alterações provenientes do aumento da temperatura. O modelo foi desenvolvido numa análise bidimensional e tem a configuração apresentada na Figura 47, que teve como base as características geométricas apresentadas na Figura 48.

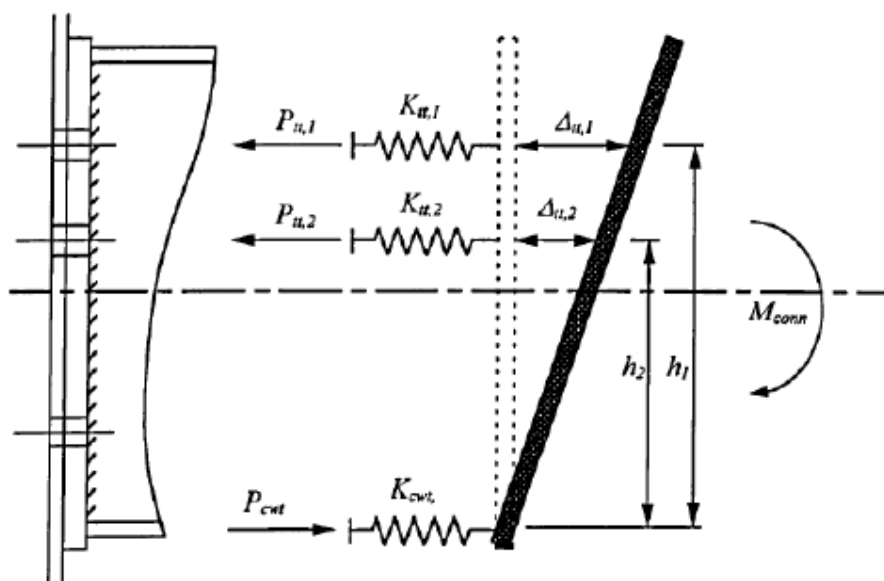


Figura 47 - Modelo de componentes de uma ligação simples com chapa de extremidade rasa.

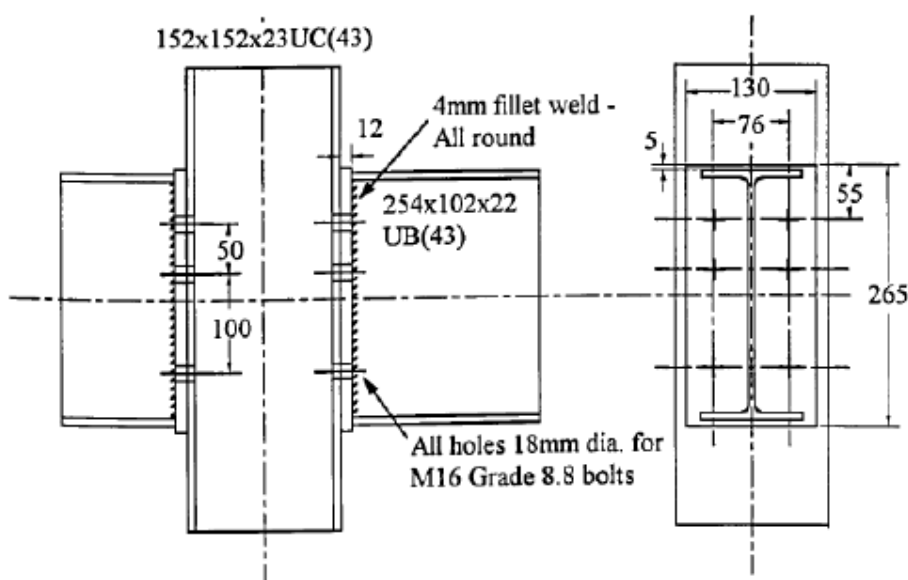


Figura 48-Ligação simples com chapa de extremidade rasa.

As componentes desta ligação são representadas por molas individuais, uma em cada alinhamento dos parafusos, cuja rigidez obedece a uma relação força-deslocamento pré-definida.

A zona de tração compreende a rigidez dos parafusos ( $K_{bt}$ ), da chapa de extremidade ( $K_{ept}$ ), e do banzo do pilar ( $K_{cft}$ ). No entanto o EC3-1-8, por simplificação, utiliza uma única mola equivalente ( $K_{eqt}$ ), como ilustra a Figura 49. A zona de compressão é representada por uma única ( $K_{cwt}$ ) mola correspondente à rigidez da alma do pilar.

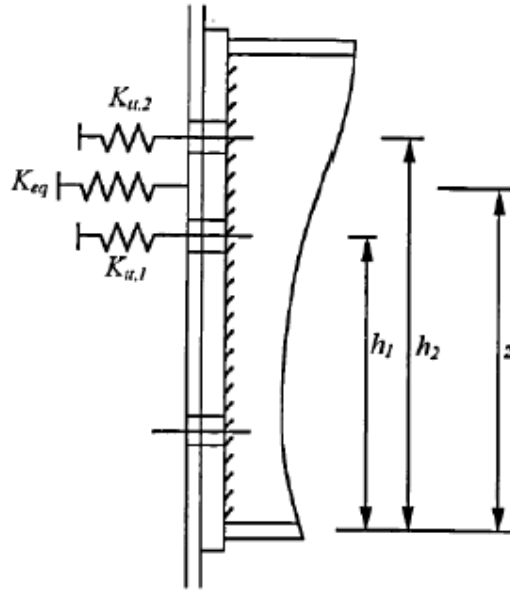


Figura 49 - Modelo de componentes com mola equivalente  $K_{eqt}$ .

A rigidez global de rotação para uma temperatura e momento aplicado é obtida através da rigidez equivalente das componentes da zona de tração e da zona de compressão de acordo com a seguinte expressão:

$$S_{ct} = \frac{1}{\frac{1}{S_{tt}} + \frac{1}{S_{ct}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{eqt} \times z^2} + \frac{1}{K_{cwt} \times z^2}}$$

Em que:

$S_{tt}$  – Rigidez de rotação da zona de tração;

$S_{ct}$  – Rigidez de rotação da zona de compressão;

$Z$  – Distância entre o centro de rotação e a mola equivalente da zona de tração (Figura 49).

Sendo que:

$$z = \frac{\sum_n (K_{tt,n} \cdot h_n^2)}{\sum_n (K_{tt,n} \cdot h_n)}$$

Em que:

$K_{tt,n}$  – Rigidez global do alinhamento de parafusos na zona de tração para uma dada temperatura;

$h_n$  – Distância entre o alinhamento e o centro de rotação da ligação.

A distribuição de forças internas de uma ligação pode ser representada por diagramas como os apresentados na Figura 50. A alínea a) do diagrama é adequado para carregamentos ligeiros, à

medida que se vai aumentando o carregamento o diagrama vai-se aproximando do apresentado em b), até atingir o regime plástico representado em c) da Figura 50.

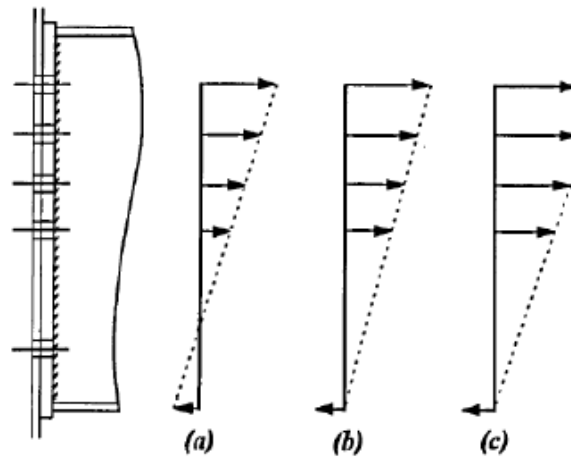


Figura 50- Diagrama de distribuição de forças.

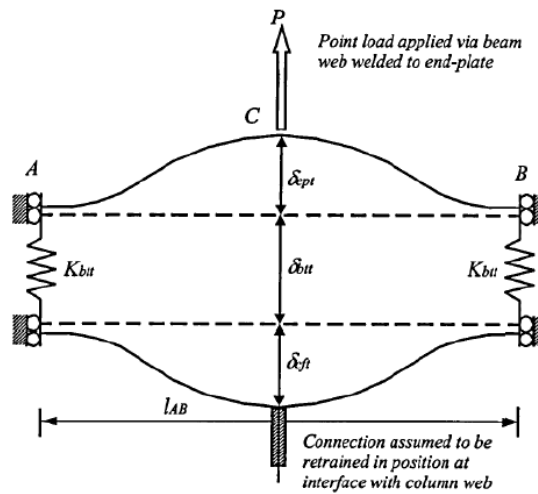


Figura 51- Planta do modelo de deformação na zona de tração.

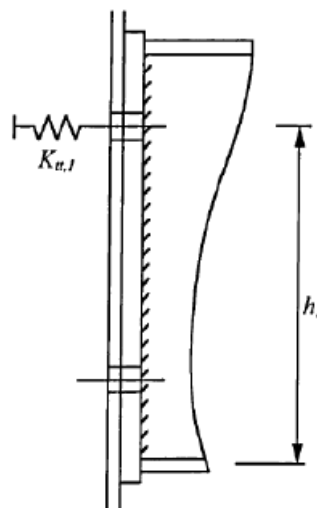


Figura 52- Modelo de componentes com um único alinhamento de parafusos.



Conhecida a rotação da ligação e a rigidez no alinhamento dos parafusos que pode ser de um (Figura 52) ou de dois ou mais (Figura 49), a força interna aplicada nesse alinhamento é dada por:

$$F_n = \phi K_{tt,n} h_n$$

A validação do modelo foi feita em duas fases, na primeira através dos resultados experimentais à temperatura ambiente, para ambos os eixos de inércia. Esta comparação inicial permite aferir a precisão do método antes da alteração das características devido ao aumento da temperatura. Observando a Figura 53 percebe-se que existe uma convergência das curvas momento-rotação do modelo de componentes e dos ensaios experimentais. Os ensaios foram realizados por Lennon e Davison para ligações segundo os eixos de maior e menor inércia, respetivamente.

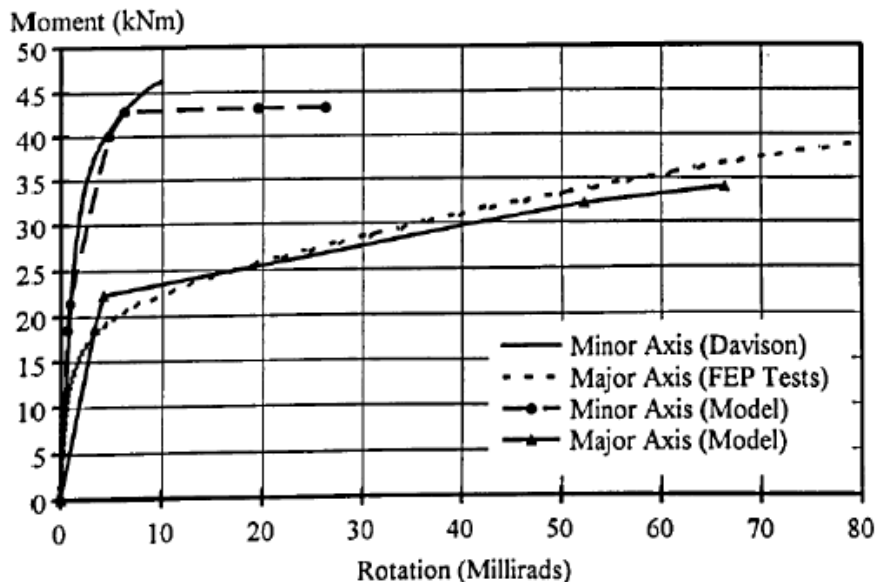


Figura 53-Curvas momento-rotação à temperatura ambiente obtidas a partir do modelo de componentes e de ensaios experimentais para ligações simples.

A validação do modelo para temperaturas elevadas é realizada mediante comparação com os resultados obtidos em ensaios que Lawson realizou. Na c (esquerda) é possível verificar que o fator de retenção da rigidez está em concordância com os valores obtidos nos ensaios experimentais. É de referir que os resultados no modelo não são consertivos até se atingir uma temperatura próxima dos 600°C, aspeto que deve ser tido em conta para efeitos de cálculo. Os valores da variação do fator de retenção da resistência também estão de acordo com os resultados experimentais como se pode verificar na Figura 54 (direita) ainda que, neste caso, os resultados do modelo são consertivos. O fator de retenção define-se como sendo o quociente entre o valor de um parâmetro (rigidez ou resistência) a uma dada temperatura e o valor desse parâmetro à temperatura ambiente.

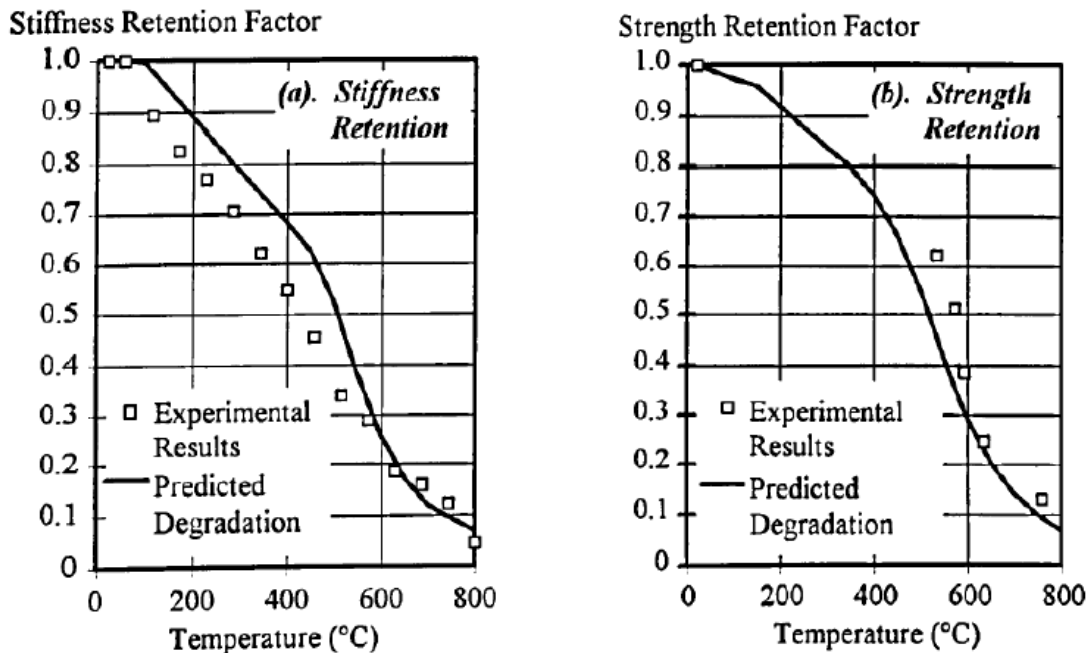


Figura 54- Evolução do fator de retenção da rigidez (esquerda); evolução do fator de retenção da resistência (direita), com o aumento da temperatura.

Tal como observado nos ensaios realizados por Lawson, à medida que a temperatura aumenta, o modelo apresenta esforços crescentes na zona de compressão, com consequente deformação da alma do pilar. Tal fenómeno torna a opção simplista de Leston-Jones que ignorou o movimento do eixo de rotação da ligação. No entanto, um dos objetivos do método é simplificar o cálculo o que, ao introduzir o referido fenómeno, tornaria o cálculo mais complexo que não era desejável.

Os resultados obtidos nos ensaios conduzidos por Lawson, estão representados nas curvas tempo-rotação da Figura 55. Nos ensaios do grupo 2, a viga não recebeu qualquer tipo de proteção contra o fogo, e foi colocado material de enchimento entre os banzos do pilar. Nos ensaios do grupo 4, a viga foi protegida com spray de vermiculite, que teoricamente lhe conferiria uma proteção de aproximadamente 60 minutos. À direita da Figura 55 pode observar-se que a ligação no modelo e no ensaio realizado praticamente não sofre rotação até aos 20 minutos que corresponde uma temperatura próxima de 450°C no banzo inferior da viga. A rápida degradação da ligação dá-se a partir deste ponto, onde se assiste a uma perda considerável da rigidez antes dos 25 minutos. Na Figura 55 à direita observa-se que o modelo prevê com bastante rigor o comportamento ocorrido nos ensaios, não tendo a ligação sofrido rotação significativa até aproximadamente aos 120 minutos, que corresponde a sensivelmente 650°C no banzo inferior da viga. Além de validarem o modelo, os resultados obtidos confirmam uma eficácia das tintas intumescentes no retardamento do colapso da ligação.

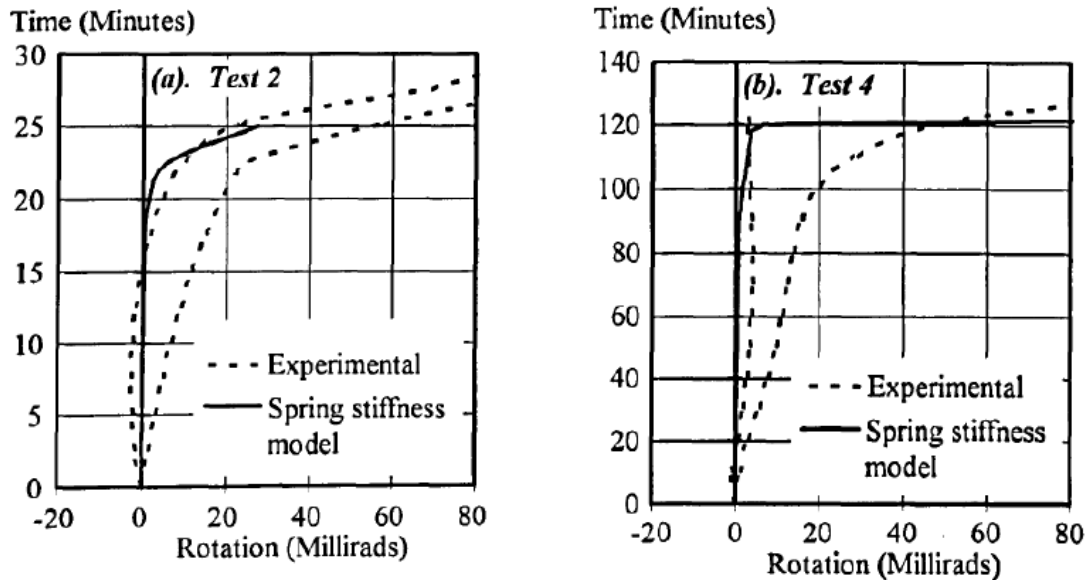


Figura 55- Curvas tempo-rotação do modelo e dos ensaios experimentais do grupo de ensaios 2 (Esquerda); Curvas tempo-rotação do modelo e dos ensaios experimentais do grupo de ensaios 4 (Direita).

Leston-Jones para além do modelo apresentado desenvolveu outro modelo para ligação mista com chapa de extremidade rasa. Da comparação do modelo de componentes com os resultados obtidos nos ensaios experimentais, conclui-se que o comportamento de uma ligação simples pode ser simulado com precisão pelo método das componentes. O modelo desenvolvido para ligações mistas apresenta discrepâncias, nomeadamente no ritmo da degradação da ligação.

### 3.5. Aspetos revelantes

#### 3.6. Comportamento das ligações e integridade estrutural

As ligações viga-pilar estão sujeitas a esforços de tração, compressão, corte, flexão e torção.

Em ligações mistas, os esforços de torção são normalmente ignorados uma vez que a laje apresenta um comportamento simétrico.

No caso das ligações com chapa de extremidade rasa ou extendida, com o acréscimo da temperatura, a ligação perde a capacidade de resistência à flexão, sendo a tração (nos parafusos) o esforço mais significativo. À temperatura ambiente, o esforço mais expressivo é a flexão.

Em ligações com chapa de *gousset*, o esforço que tem um papel fulcral é o de corte, pois estas ligações apresentam o corte dos parafusos e o esmagamento da chapa na forma de rotura.

Como caraterísticas essenciais na transmissão de esforços, entre elementos da ligação, destacam-se a ductilidade e a resistência que conferem distintos níveis de flexibilidade e capacidade de rotação. Assim, numa situação de incêndio não ocorre um rápido colapso uma vez que as deformações atuam gradualmente.

### **3.7. Comportamento das vigas e ação em catenária**

Numa situação de incêndio, as vigas sofrem uma expansão axial inicial entre os 100°C e os 400°C podendo provocar deformações nos elementos vizinhos. No caso de os pilares apresentarem uma rigidez elevada, a viga começará a encurvar no sentido descendente, devido aos elevados esforços de compressão que esta possui.

A viga entra em estado catenário devido ao seu peso e aos carregamentos aplicados, passando os esforços a ser de tração e não de compressão, geralmente, após os 400°C. Assim, a viga começa a comportar-se como um cabo suspenso, sem resistência à flexão, e os esforços são transmitidos para os elementos estruturais por intermédio do esforço axial. Em caso de incêndio, o tempo de vida da estrutura pode ser aumentado se as ligações estiverem dimensionadas para possuírem temperaturas inferiores às da viga.

### **3.8. Interação com a estrutura adjacente**

Quando se fala em ligação resistente ao fogo, é importante conhecer o comportamento desta com a estrutura adjacente. Com um acréscimo de temperatura, a expansão térmica de um dado elemento depende das características dos elementos adjacentes, tendo como consequência graus de degradação diferentes.

Enquanto as deformações aumentam na estrutura, os esforços têm de ser redistribuídos. Assim, os elementos degradados transferem os seus esforços ou a totalidade destes (no caso de rotura) para outros elementos menos atingidos pelo incêndio ou que sejam mais resistentes.

### **3.9. Fase de arrefecimento**

Na fase de aquecimento, as vigas apresentam extensões elevadas, no entanto, quando a temperatura começa a diminuir, ocorre a contração dessas expansões. Numa viga em catenária, é importante ter em conta o aumento nos esforços de tração, consequência da contração e de elementos da ligação como por exemplo, os parafusos, embora as deformações não sejam tão acentuadas em dimensões pequenas.

### **3.10. Colapso progressivo**

O colapso progressivo é desencadeado pela rotura de um único elemento ou de um conjunto de elementos, que origina uma sequência de roturas em outros elementos, causando a ruína total ou parcial do edifício. Este tipo de colapso ocorre não só em incêndios, mas também sismos, explosões ou acidentes de viação.

## **4. MODELAÇÃO NUMÉRICA**

As modelações numéricas têm como principal objetivo representar de uma forma precisa os fenômenos reais. No presente estudo, o objetivo é perceber qual o comportamento da zona da ligação pilar-viga em estruturas metálicas, para o desenvolvimento do mesmo, foram criados três tipos de ligação diferentes, são eles chapa de topo, dupla cantoneira de alma e dupla cantoneira de banzo com chapa de *gousset*. De modo a perceber qual a influência da classe do aço no comportamento das ligações sujeitas a temperaturas elevadas foram estudadas quatro classes resistentes de aço para o pilar, enquanto a viga foi sempre analisada com um IPE-160.

A análise dos modelos foi executada com recurso ao *software* ABAQUS, no presente capítulo é feita uma descrição, das funcionalidades necessárias para o desenvolvimento do presente estudo.

#### **4.1. ABAQUS**

O *software* ABAQUS, é um programa para análise de elementos finitos, onde as equações de equilíbrio são obtidas pelo princípio dos trabalhos virtuais, onde cada ponto material é função das coordenadas e do tempo e tem como base a aproximação das condições de equilíbrio de um determinado corpo através do ponto de vista Lagrangiano.

O presente subcapítulo tem como objetivo, explicar de forma sucinta algumas das suas funcionalidades e ferramentas utilizadas no presente estudo.

##### **ABAQUS/CAE**

O ABAQUS/CAE (*Complete Abaqus Environment*) proporciona uma interface gráfica capaz de criar, submeter, monitorizar e avaliar resultados das simulações Abaqus/Standart e Abaqus/Explicit, e divide-se em pré processador e pós processador. No primeiro, é gerado o arquivo de entrada de dados relativamente à geometria, propriedades dos materiais, condições de fronteira, níveis de carregamento aplicados e a malha de elementos finitos. No pós processador, é possível a visualização gráfica dos resultados de análise.

A plataforma inclui funcionalidades informáticas de engenharia comuns, como modelação paramétrica ou baseada em características, funcionamento predefinido ou interativo, e personalização da interface. Esta plataforma possibilita ao utilizador importar modelos de CAD para definir a malha de elementos finitos, ou solicitar a atribuição de uma malha com base na geometria introduzida.

##### **ABAQUS/Standart**

O ABAQUS/Standart está direcionado para situações estáticas ou dinâmicas a baixas velocidades. A análise de um modelo nos domínios de tempo e de frequência, é possível com apenas uma simulação. A título de exemplo, é possível realizar uma análise não linear à fixação da tampa de um motor tendo em consideração os aspetos mecânicos complexos de uma junta da cabeça. Consegue-se determinar a frequência própria da tampa, ou a sua frequência induzida pelas vibrações do motor, nos domínios mecânicos e acústicos.

##### **ABAQUS/Explicit**

O ABAQUS/Explicit é utilizado para simular acontecimentos dinâmicos ou processos quase estáticos, como por exemplo uma mudança das condições de fronteira.

O *software* ABAQUS permite que a condição inicial de uma análise ABAQUS/Explicit seja um modelo corrido no ABAQUS/Standard e vice-versa. A flexibilidade garantida permite aplicar o ABAQUS/Standard nas fases que se adequam a uma resolução por métodos implícitos como por exemplo: análises estáticas, a baixas velocidades ou em regime permanente, em análises de regime variável ou altas velocidades utiliza-se o ABAQUS/Explicit.

## 4.2. Modulação numérica com o programa ABAQUS

Para se criar um novo banco de dados inicia-se o ABAQUS CAE, o *software* apresenta uma janela de trabalho como ilustra a Figura 56.

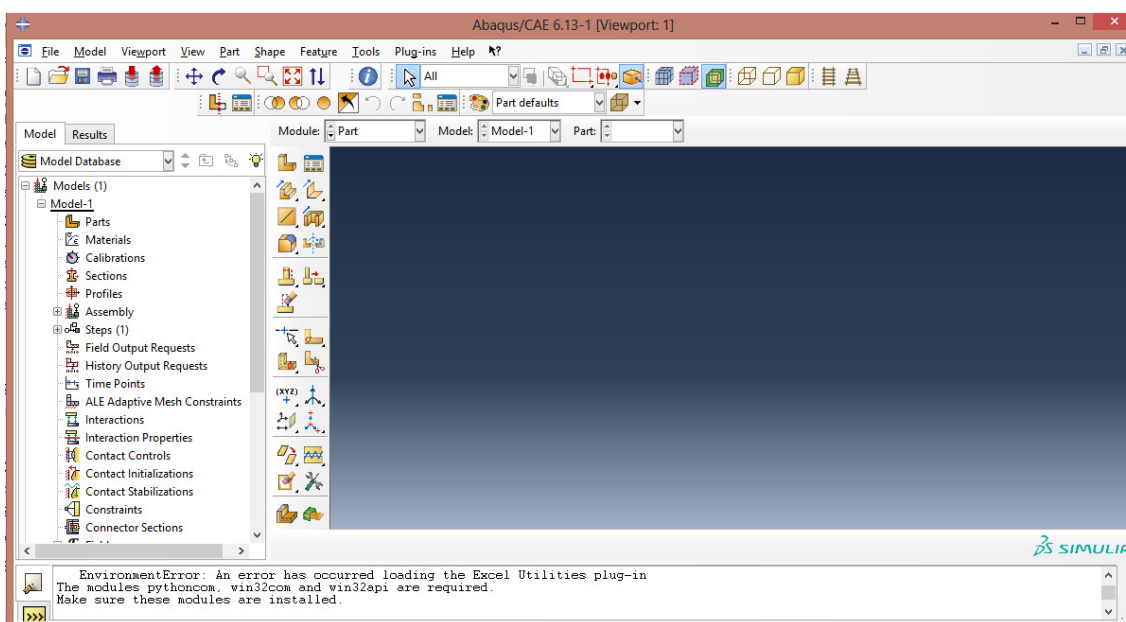


Figura 56- Janela de trabalho ABAQUS CAE.

### i. Módulo Part

O módulo Part é utilizado para criar (Figura 57), editar e gerir as partes do modelo em desenvolvimento. O modelo é formado pela criação das partes constituintes e é armazenado com as características geométricas de todas as partes e com as regras que gerem o seu comportamento.

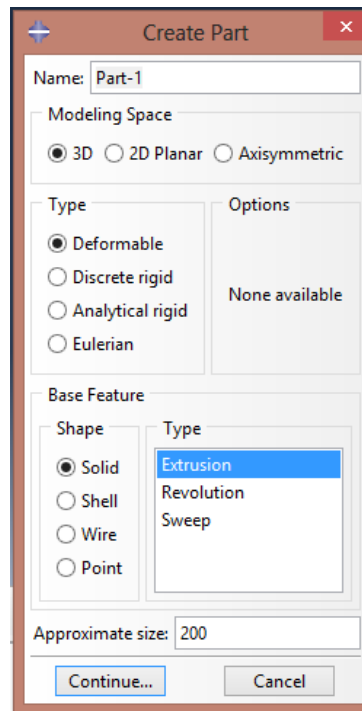


Figura 57-Janela de diálogo para criação de uma *Part*.

As características de cada *Part* é guardada em forma de lista (Figura 61).

Foram criadas diferentes partes para o presente trabalho:

- Cantoneira de Gousset;
- Cantoneira de alma;
- Viga IPE 160;
- Pilar IPE 240; IPE 300;
- Pilar HEA 180;
- Pilar HEB 160.

As partes são independentes e cada uma tem o seu próprio sistema de coordenadas. A Figura 58 mostra algumas das partes desenvolvidas neste módulo.

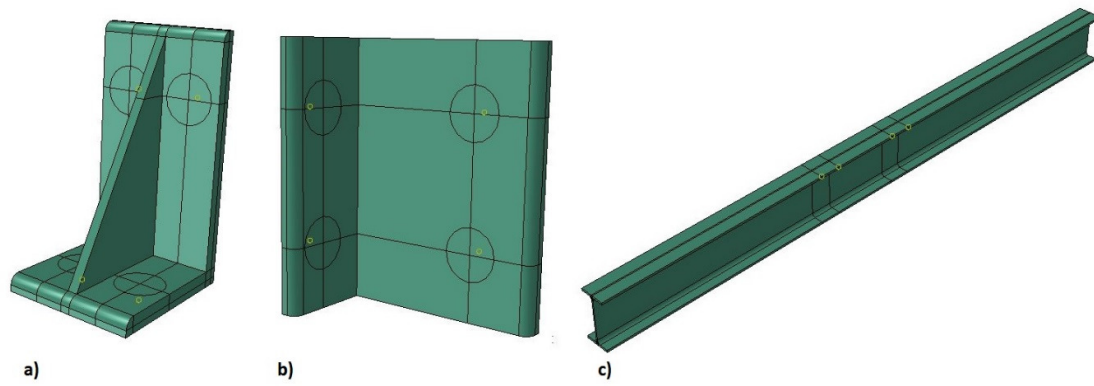


Figura 58: a) cantoneira com *Gousset*; b) Cantoneira de alma; c) Pilar.

## ii. Módulo Property

No módulo Property são criados (Figura 59) e editados (Figura 60) os vários materiais, são definidas as propriedades como condutividade, densidade, elasticidade e plasticidade.

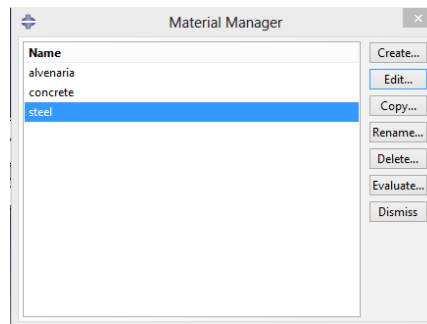


Figura 59- Gerador de materiais.

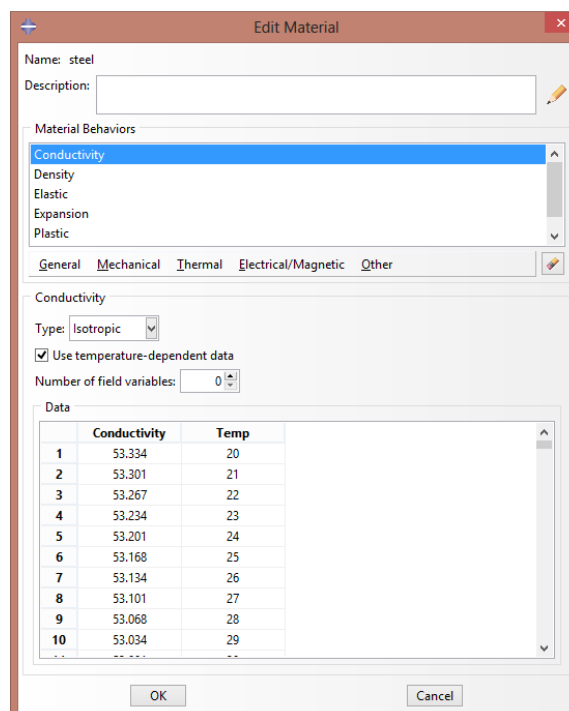


Figura 60-Editor de material.



Para efeitos deste trabalho o material utilizado foi unicamente aço e, na Figura 61, é possível consultar as características atribuídas ao perfil IPE 240.

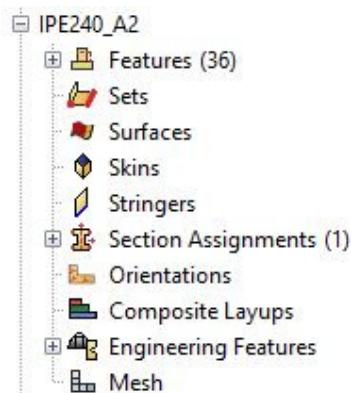


Figura 61: Lista de características IPE240.

### iii. Módulo Assembly

No módulo Assembly é criada e modificada a montagem das partes constituintes do modelo. Neste módulo, cada parte tem atribuído um sistema de coordenadas, sendo que o conjunto de todas partes, irá dar origem a um único modelo possuindo um único sistema de coordenadas global. O posicionamento de cada parte é obtido com a aplicação de restrições que permitem alinhar faces, arestas ou vértices, por translações ou rotações. No caso da geometria de uma parte ou modelo sofrer alguma modificação, o programa corrige automaticamente todos as instâncias dessa parte ou modelo.

A Figura 62 mostra na a) uma aproximação onde é possível observar as três partes do modelo, na alínea b) está representado o modelo na sua totalidade.

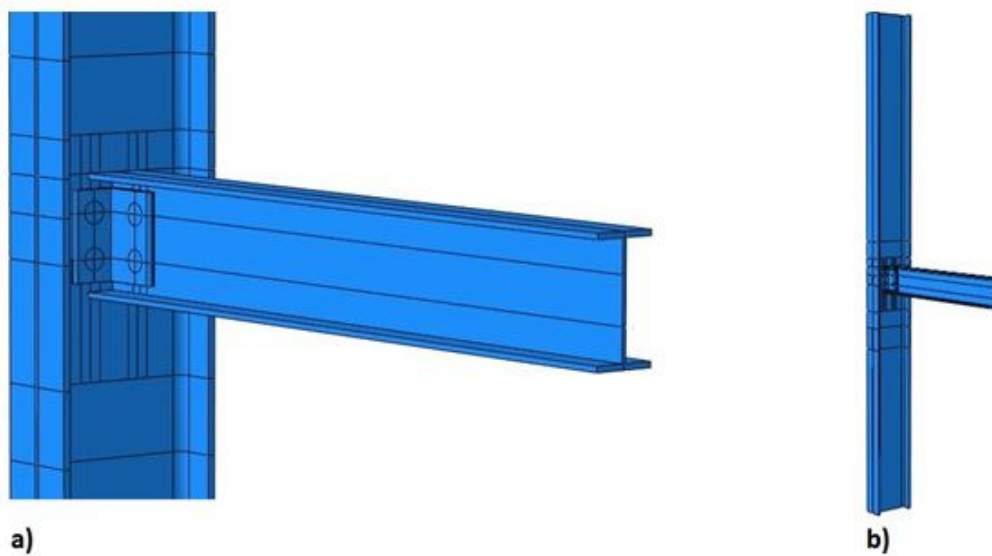


Figura 62: a) Zoom zona da ligação; b) Modelo completo.

#### iv. Módulo Step

O módulo Step (Figura 62) é utilizado para criar e definir diferentes etapas de análise. Estas etapas, permitem atribuir alterações nos carregamentos e condições de fronteira nos modelos, alterar interações do comportamento das peças e adicionar ou remover partes do modelo. O procedimento de análise e saída de dados pode ser modificado neste módulo. Após a primeira fase ser criada, o ABAQUS associa um conjunto de variáveis de saídas correspondentes ao procedimento da etapa de análise. Por defeito, para cada ponto ou nó de integração, são pedidos dados de saída, e ainda é estabelecida a frequência de gravação das variáveis na base de dados da saída.

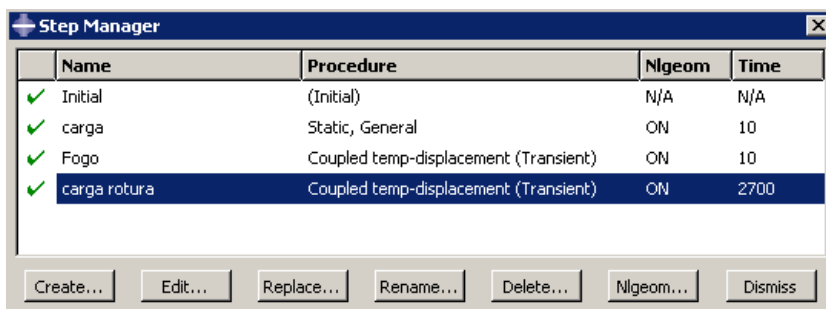


Figura 63- Janela de diálogo do módulo STEP.

Para cada *Step*, que neste caso em concreto são três, na Figura 64 é possível verificar algumas das definições do *Step* carga; o *Step* fogo está definido como ilustra a Figura 65, e por fim na Figura 66 é apresentado o *Step*, carga de rotura.

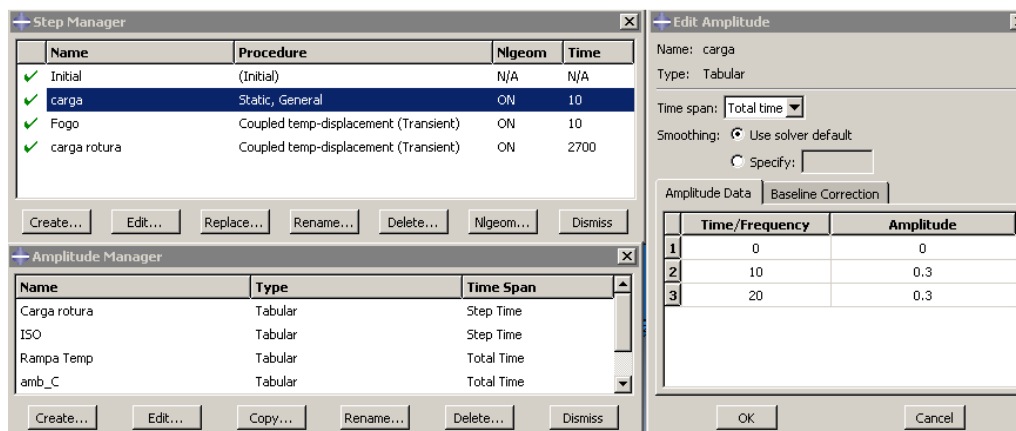


Figura 64 - Editor do Step Carga.

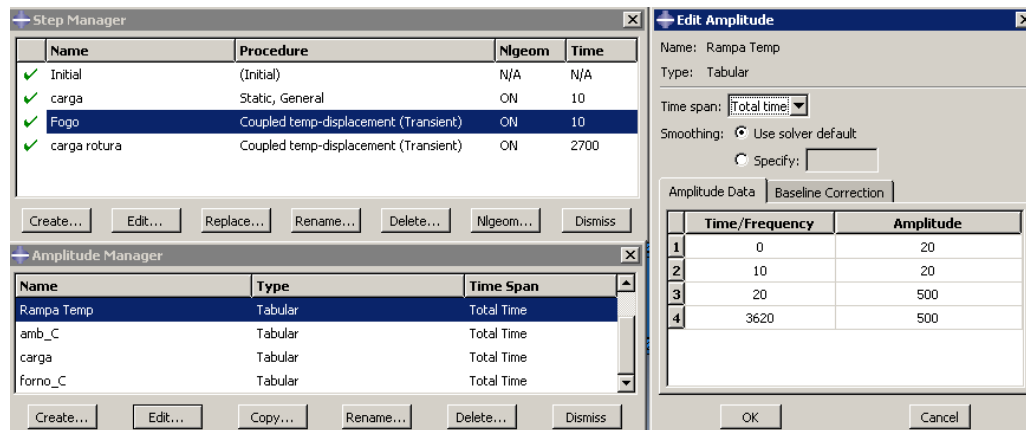


Figura 65- Editor Step Fogo.

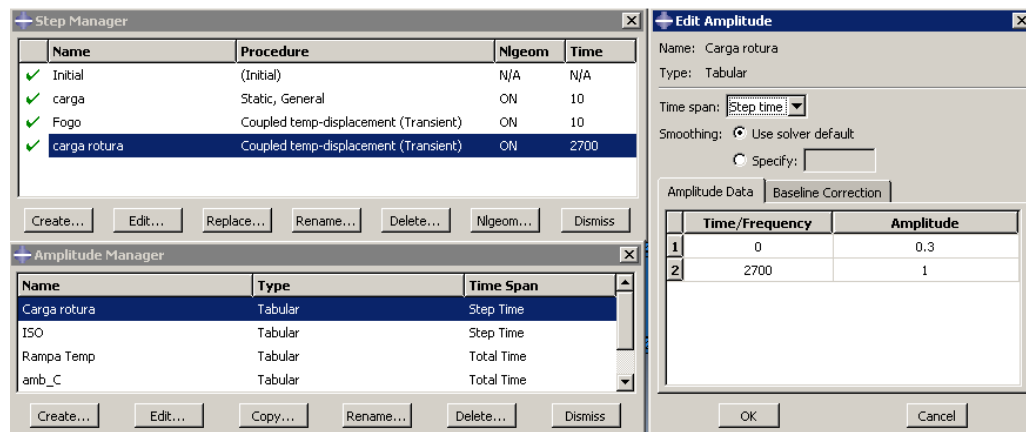


Figura 66- Editor Step Carga Rotura.

## v. Módulo Iteration

Este módulo permite definir e gerir as diferentes interações e funcionalidades do modelo, nas diversas fases de análise. Estas interações podem ser: mecânicas e térmicas entre regiões ou entre regiões e a vizinhança; restrições de análise entre regiões; características da montagem de elementos linha; definição e atribuição de seções a conectores; inércia e fissuração em regiões; molas e amortecedores.

No caso da modelação para o desenvolvimento do presente trabalho foram consideradas duas transferências de calor diferentes. Na Figura 67 é possível visualizar qual a zona do modelo que será aquecida, bem como na Figura 68 é possível visualizar a região do modelo que estará exposta à temperatura ambiente. Na Figura 69 é possível ver com mais detalhe cada uma das diferentes regiões.

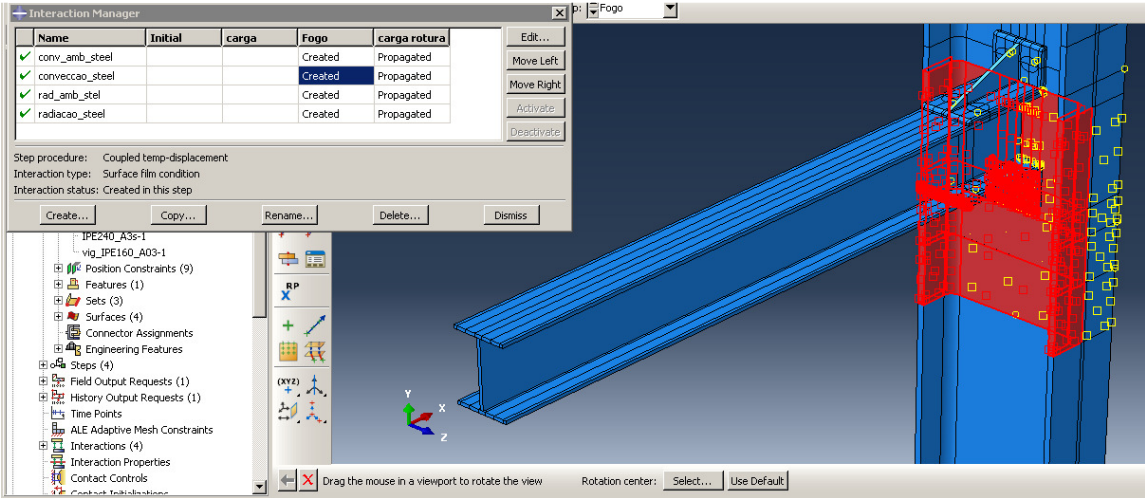


Figura 67- Radiação.

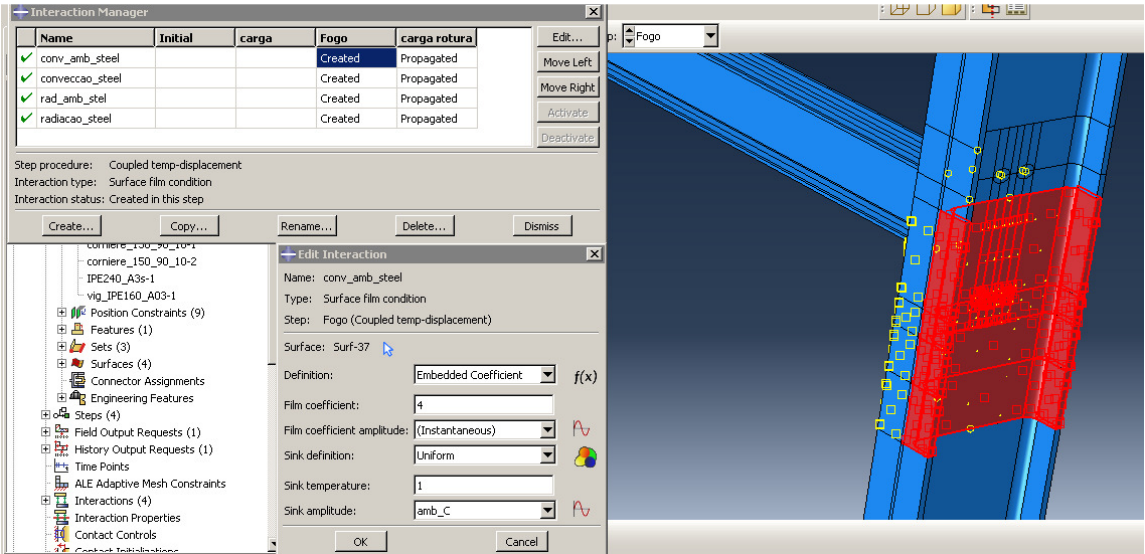


Figura 68- Convecção.

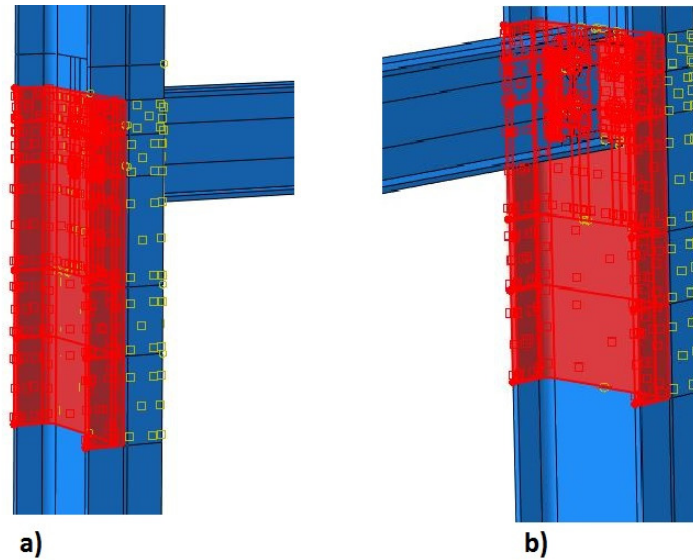


Figura 69: Superfícies expostas à condição ambiente; b) superfícies expostas ao fogo.

#### vi. Módulo Load

Este módulo é usado para definir e gerir condições de carregamento, condições de fronteira, campos predefinidos e ações de carregamento. Ainda é possível especificar tempo ou dependências que serão aplicadas às condições determinadas. Depois de definida a carga e ponto de aplicação, é possível observar graficamente o ponto de aplicação e a direção da carga, como se verifica na Figura 70.

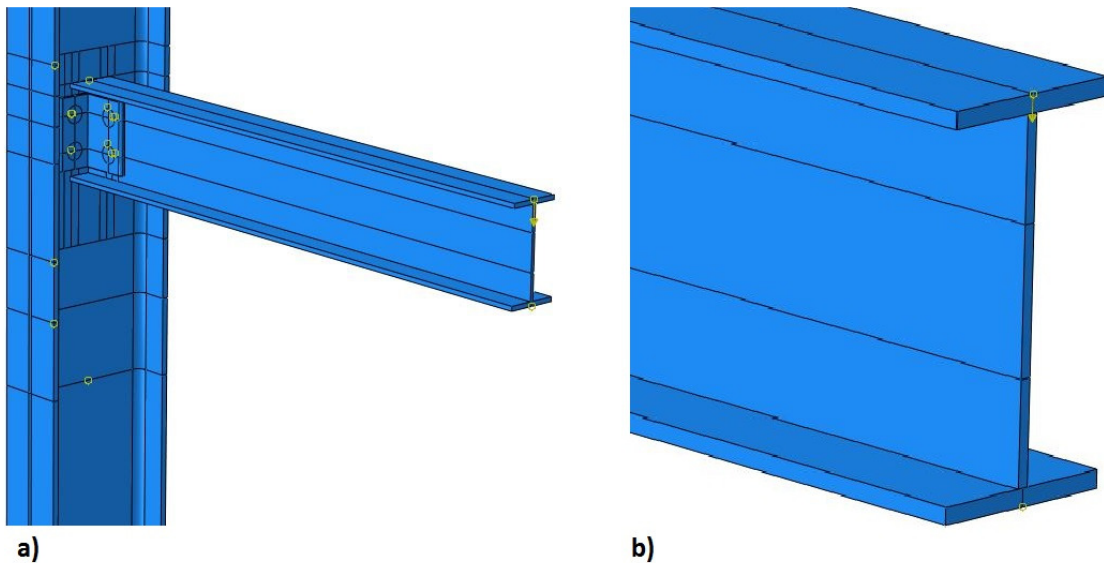


Figura 70: a) Aplicação da carga; b) Ampliação à zona de aplicação da carga.

#### vii. Módulo Mesh

O módulo Mesh é utilizado para gerir as malhas das partes criadas e montagens obtidas com o ABAQUS/CAE. Este inclui um conjunto de ferramentas que permite especificar a densidade e controle de malha, a forma do elemento definir distintas malhas e modelos.

A dimensão da malha é um indicador da precisão da análise de cada elemento, quanto mais apertada é a malha maior será a precisão dos resultados obtidos. Na Figura 71 é possível verificar que a malha no pilar é de uma dimensão mais pequena que a malha da viga, esta opção foi tomada em função do objetivo deste trabalho que procura estudar a zona da ligação pelo que a deformação que ocorre na viga tem menor relevância.

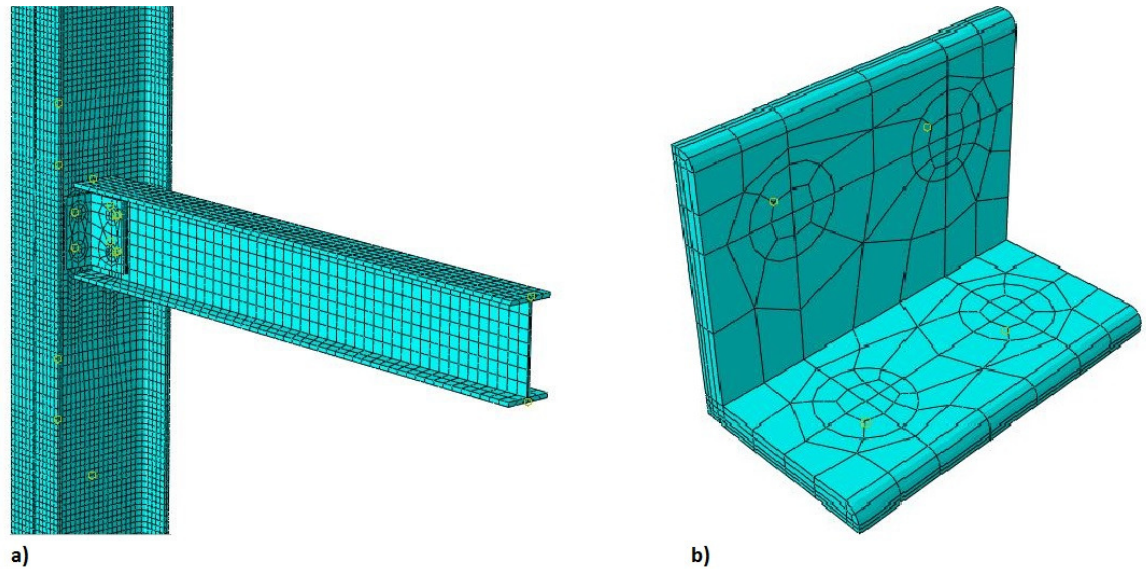


Figura 71: a) Malha em todos os elementos; b) Malha em cantoneira.

#### **viii. Módulo Job**

Este módulo permite monitorizar e gerir o processo de análise do modelo. Ainda é utilizado para criar, submeter e monitorizar novos modelos e trabalhos (ABAQUS, 2000).

As tarefas são armazenadas num ficheiro de entrada (input), de extensão. `.inp`. O programa escreve os resultados numa base de dados – o ficheiro de extensão. `.odb` (output database), que se abre através do módulo Visualization como ilustra a Figura 72 onde é possível visualizar as tensões de Von Mises.



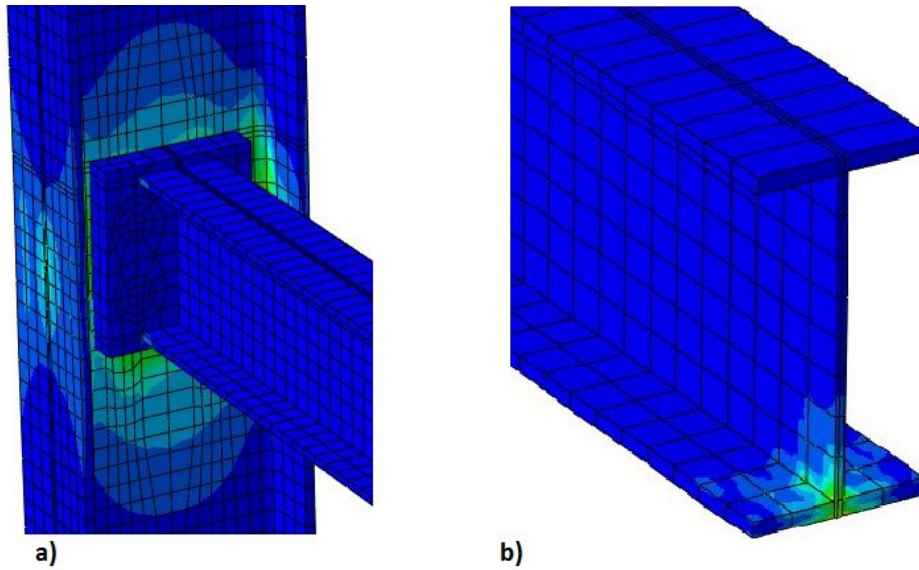


Figura 72: Tensão de Von Mises na ligação; b) Tensão de Von Mises na extremidade da viga.

### 4.3. Estruturação dos modelos analisados

No presente estudo foi utilizada a versão 6.13-1 do *software* ABAQUS, para que se possam simular as situações reais, é imperativo conferir aos elementos que constituem os modelos, todas as suas propriedades de forma rigorosa. Nos modelos de cálculo construídos, foram utilizados dois tipos de elementos, C3D8RT e C3D20RT, definidos como elementos hexaédricos com 8 e 20 nós, lineares, com integração reduzida de primeira ordem. Estes elementos são caracterizados por terem pontos de integração com três graus de liberdade por nó, respeitantes às translações e rotações nas direções X, Y e Z, gerando seis componentes de tensão em cada elemento de saída. Os elementos do tipo C3D20RT foram utilizados apenas nos pilares, com dimensões aproximadas de 30mm, na restante estrutura envolvente foram utilizados elementos C3D8RT.

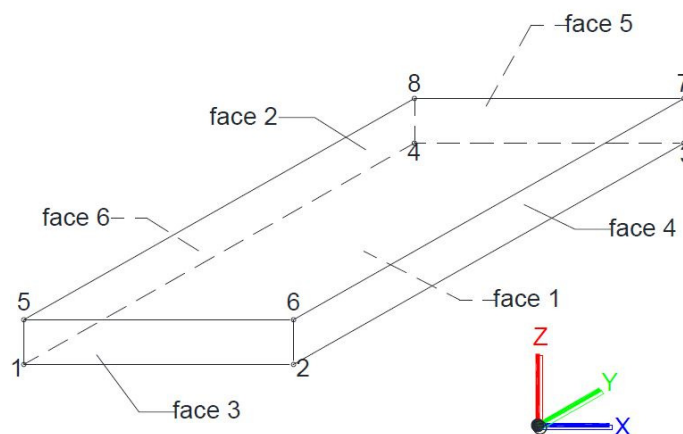


Figura 73: Detalhe do elemento finito C3D8RT.

A definição das propriedades térmicas e mecânicas dos elementos constituintes dos modelos, foi feita a partir do Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), definiu-se a condutibilidade térmica e calor específico, em função da temperatura, para os elementos de aço, sendo o peso específico do aço 7850 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.4. Definição das ações

As ações aplicadas nos modelos são definidas no módulo Step, no presente estudo as ações aplicadas nos modelos são mecânicas, aplicadas pelo Step Carga e ação térmica aplicada pelo Step Fogo. A ordem de aplicação das ações também fica definida neste módulo, neste caso a carga é aplicada antes da ação do fogo.

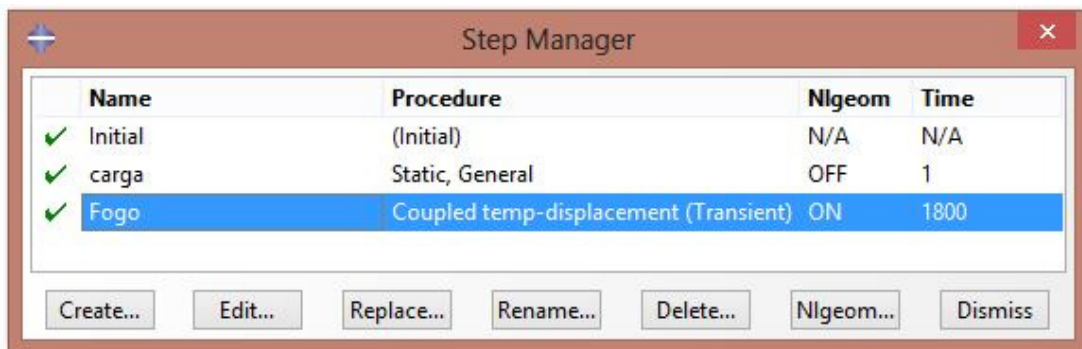


Figura 74: Ordem de aplicação da ação.

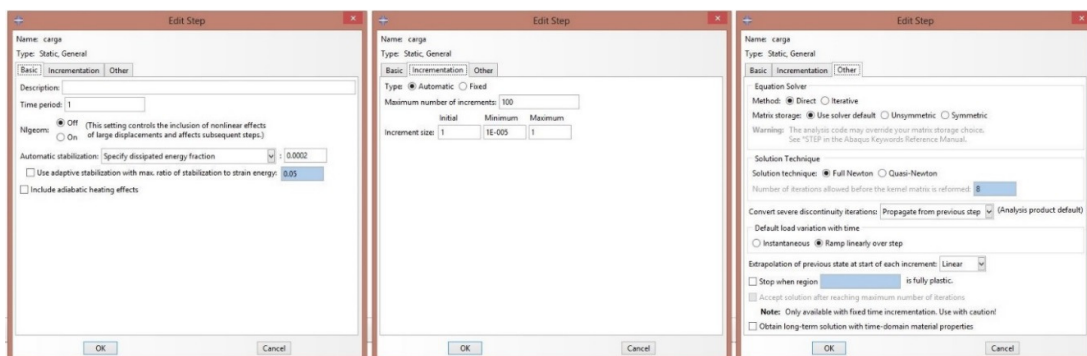


Figura 75: Especificações do Step Carga.

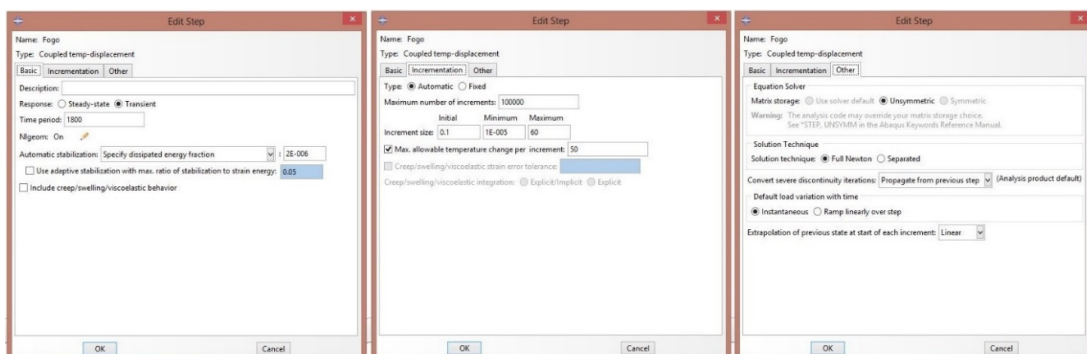


Figura 76: Especificações do Step Fogo.



#### 4.5. Aplicação das ações

Na aplicação da ação térmica no modelo, foram tidos em conta os diferentes mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação. A ação térmica não foi aplicada em todo o modelo para o presente estudo, uma vez que estamos a estudar a zona da ligação viga-pilar. Optou-se por delimitar uma área que nos pareceu conveniente, assim, aplicamos ação térmica a partir do limite do banzo superior da viga e até uma distância de 50cm abaixo deste, considerando que em cima da viga apoia uma laje, cujo seu peso não foi tido em conta para o efeito.

Para a transferência de calor por convecção definiu-se o coeficiente  $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , para a zona diretamente exposta ao fogo, a zona não aquecida o coeficiente teve o valor de  $9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

No caso da radiação, foi considerada na zona exposta um coeficiente de emissividade  $\varepsilon = 0,9$ . A aplicação da curva de incêndio, por forma a simular o aquecimento dos gases do meio envolvente, foi de acordo com o Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), tendo sido aplicada a curva de incêndio padrão ISO 834.

A radiação e convecção da zona não aquecida foi aplicada na parte posterior do pilar, no *model interaction*, foram criadas as ações a aplicar e definida a superfície onde a ação é aplicada. A ação térmica provocada pelo fogo é aplicada nos elementos que se encontram de frente para este.

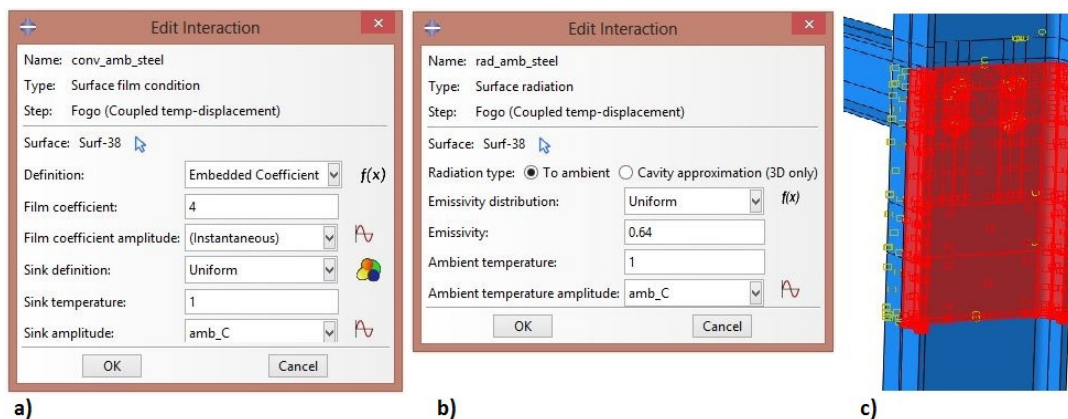


Figura 77: a) Convecção Ambiente; b) Radiação Ambiente; c) Superfície (a vermelho) de aplicação ação.

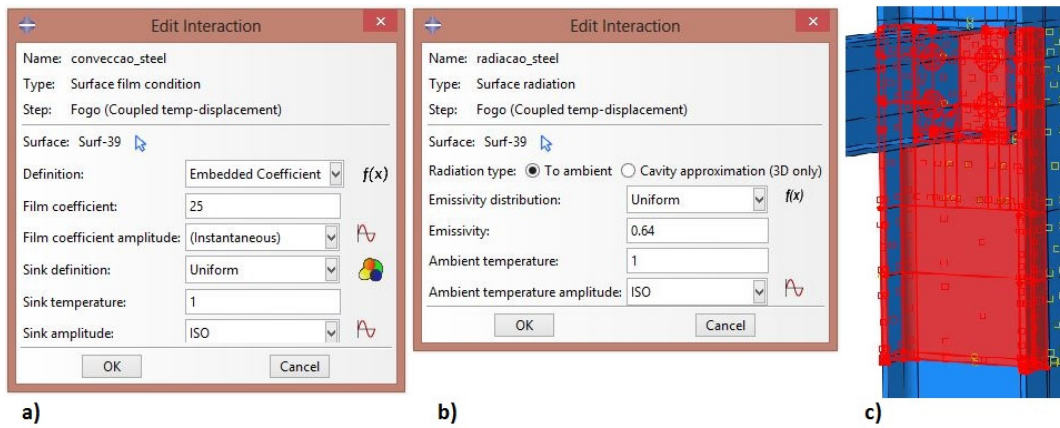


Figura 78: a) Convecção Fogo; b) Radiação Fogo; c) Superfície (a vermelho) de aplicação da ação.

#### 4.6. Definição da malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos é definida no módulo *Mesh* através da caixa de dialogo da Figura 79, a maior ou menor precisão dos resultados depende do tamanho desta malha, quanto maior a dimensão da malha menor a precisão da análise.

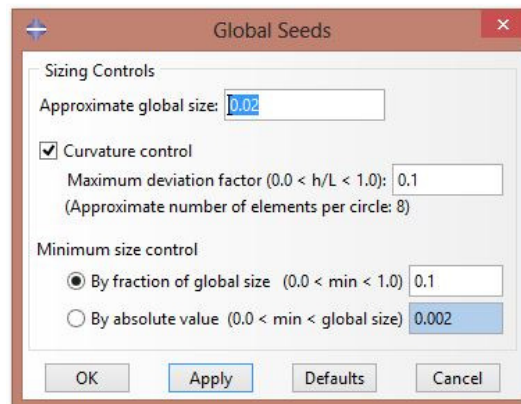


Figura 79: Características da malha.

#### 4.7. Análise

Concluída a inserção dos dados, cria-se através do módulo Job o trabalho virtual, que vai aplicar ao modelo as ações referidas anteriormente. Após submeter o modelo ao trabalho virtual, inicia-se a análise que é monitorizada pelas ferramentas deste módulo.

A Figura 80 é a janela de diálogo que possibilita definir o tipo de trabalho virtual pretendido na análise.

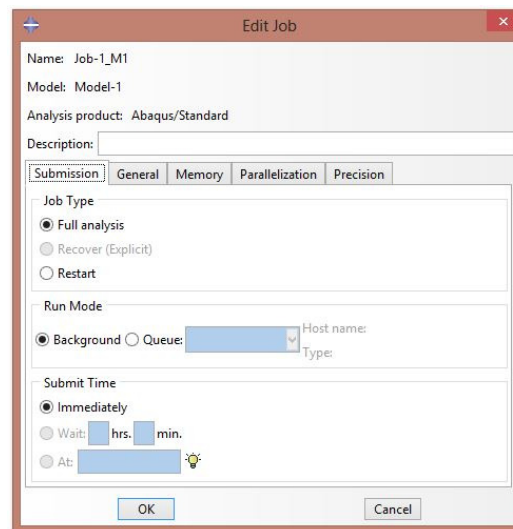


Figura 80: Painel de edição do trabalho virtual.

#### 4.8. Resultados

Finalizado o trabalho virtual, no módulo Visualization, é possível visualizar as deformações ocorridas no modelo. A partir do referido módulo, é possível retirar os valores das tensões de *Von Mises*, no modelo é possível avaliar a zona onde ocorrem as deformações.

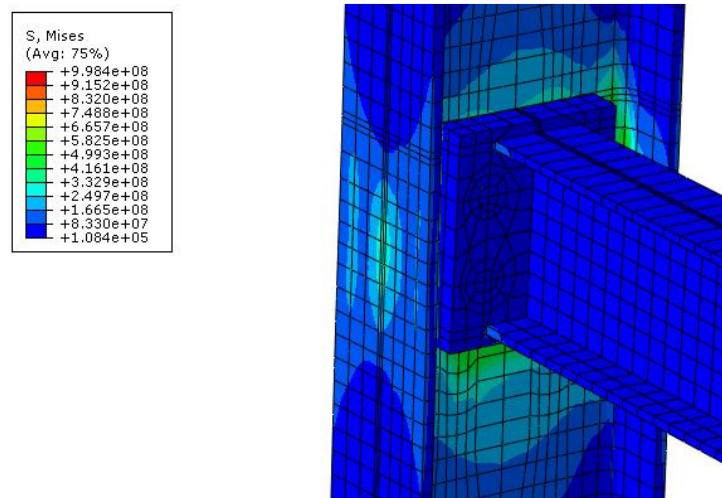


Figura 81: Módulo *Visualization*, tensões *Von Mises*.

#### 4.9. Plano de ensaios

Foram modelados três dos tipos de ligação mais utilizados na construção de estruturas metálicas correntes, a modelação para efeitos deste trabalho não contempla os parafusos e as suas condições de fronteira, pelo que não se observará a ocorrência do colapso da ligação pela rotura dos parafusos. O objetivo deste estudo era perceber o comportamento da ligação como um todo, na constituição dos modelos optou-se por modelar apenas um tipo de viga constituída por um

IPE-160. Os pilares uma vez que recebem as forças exercidas pela viga, foram modelados quatro tipos diferentes com o objetivo de perceber qual a influência da classe resistente do aço no comportamento da ligação a frio e a temperaturas elevadas, analisaram-se os perfis: IPE-240, IPE-300, HEA-180 e HEB-160.

Quadro 4: Composição dos modelos analisados.

Modelo	Pilar		Viga		Ligação
	Perfil	Ref.	Perfil	Ref.	
1	IPE-240	IPE240_A1-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A1-1	C.T.
2	IPE-240	IPE240_A2-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A2-1	C.L.
3	IPE-240	IPE240_A3s-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A03-1	C.S.
4	IPE-300	IPE300_A4-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A4-1	C.T.
5	IPE-300	IPE300_A5-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A2-1	C.L.
6	IPE-300	IPE300_A6s-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A03-1	C.S.
7	HEA - 180	HEA180-1	IPE - 160	Viga_IPE160-1	C.T.
8	HEA - 180	HEA180_A8-1	IPE - 160	Viga_IPE160_A08-1	C.L.
9	HEA - 180	HEA180_A9s-1	IPE - 160	Vig_IPE160_A09s-1	C.S.
10	HEB - 160	Pilar_HEB160-1	IPE - 160	Viga_IPE160-1	C.T.
11	HEB - 160	Pilar_HEB160_A11-1	IPE - 160	Viga_IPE160_s_Chapa-1	C.L.
12	HEB - 160	Pilar_HEB160_A12s-1	IPE - 160	Vig_IPE160_A12s-1	C.S.
C.T. Chapa de topo; C.L. Cantoneira lateral; C.S. Cantoneira Superior					

Seguidamente, apresentam-se imagens dos vários modelos de ligação viga-pilar estudados:

#### 4.10. Modelo 1

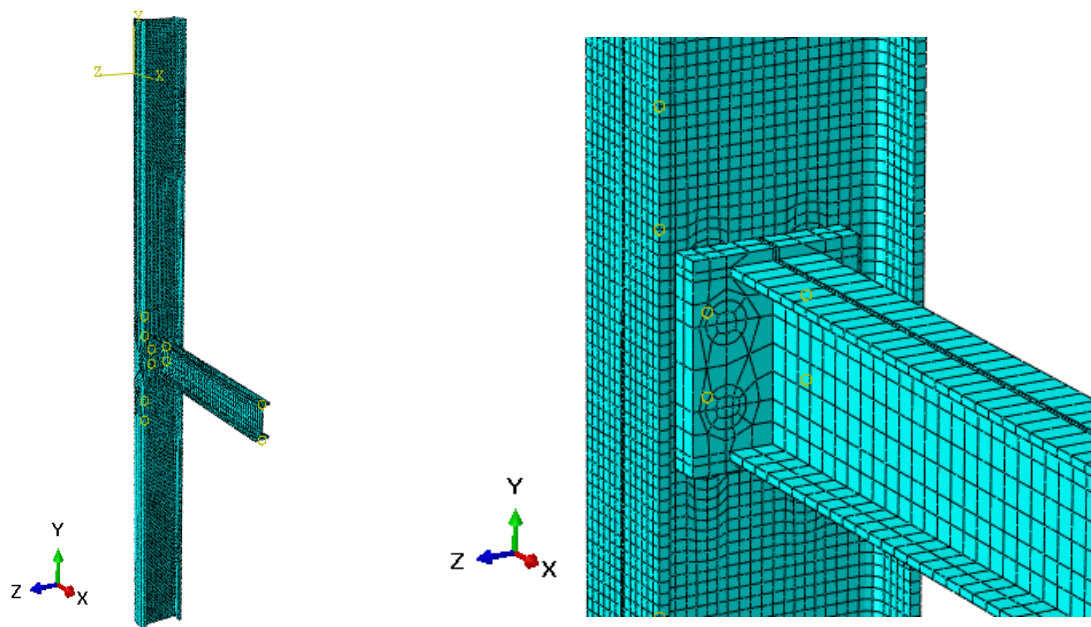


Figura 82: Perspetivas da ligação no Modelo 1.

#### 4.11. Modelo 2

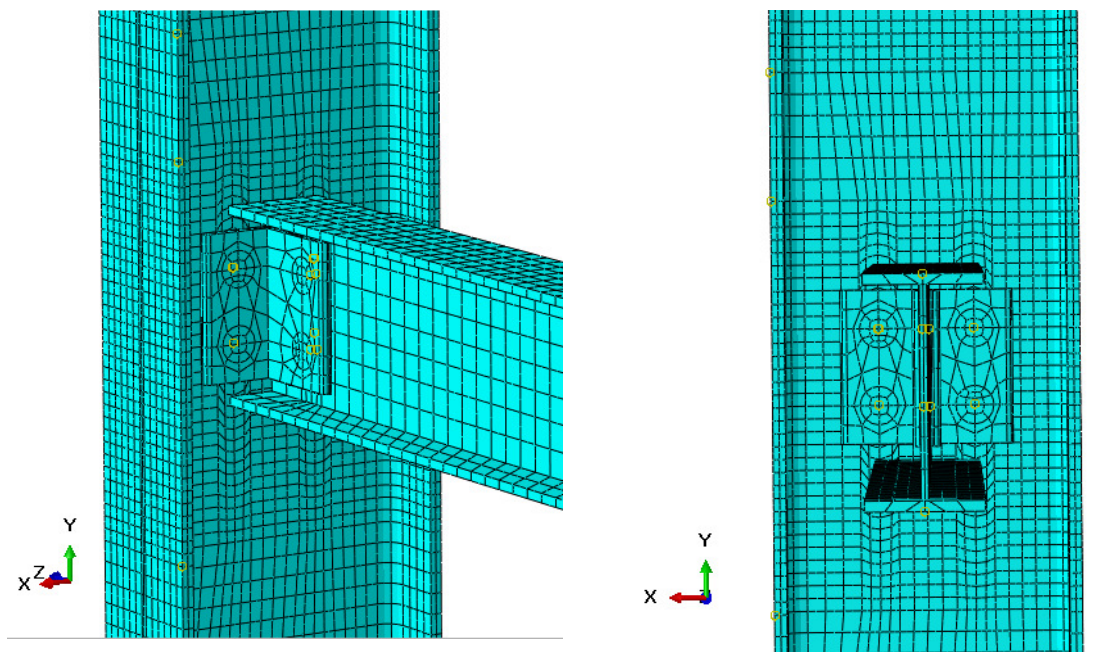


Figura 83: Perspetivas da ligação no Modelo 2.

#### 4.12. Modelo 3

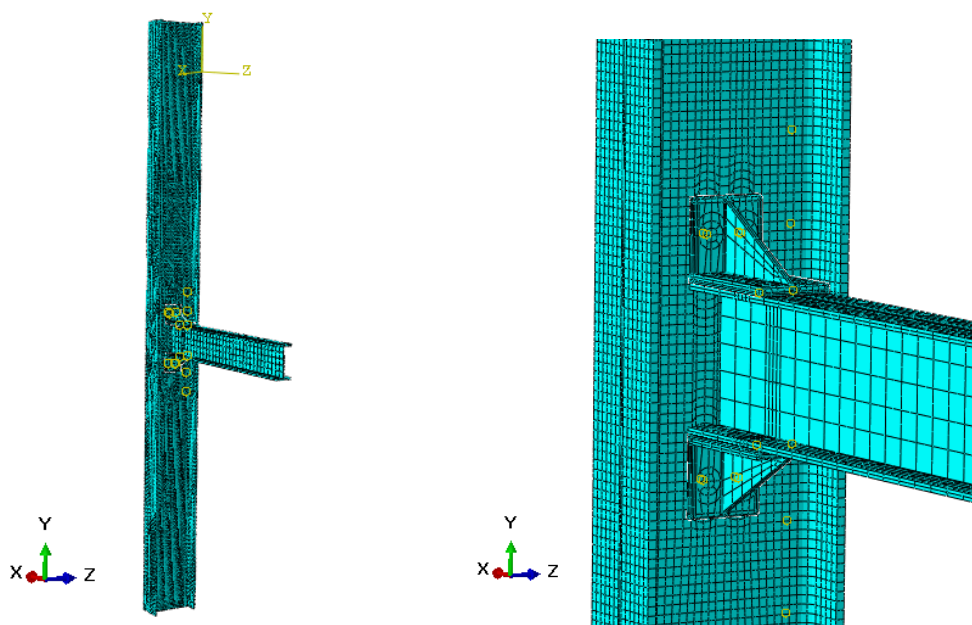


Figura 84: Perspetivas da ligação no Modelo 3.



**4.13. Modelo 4**

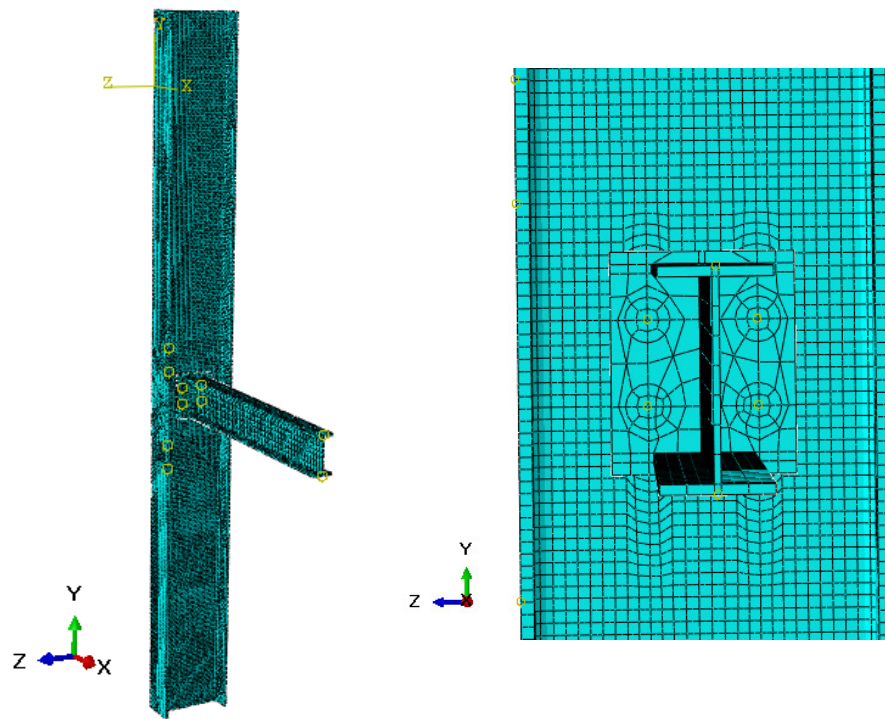


Figura 85: Perspetivas da ligação no Modelo 4.

**4.14. Modelo 5**

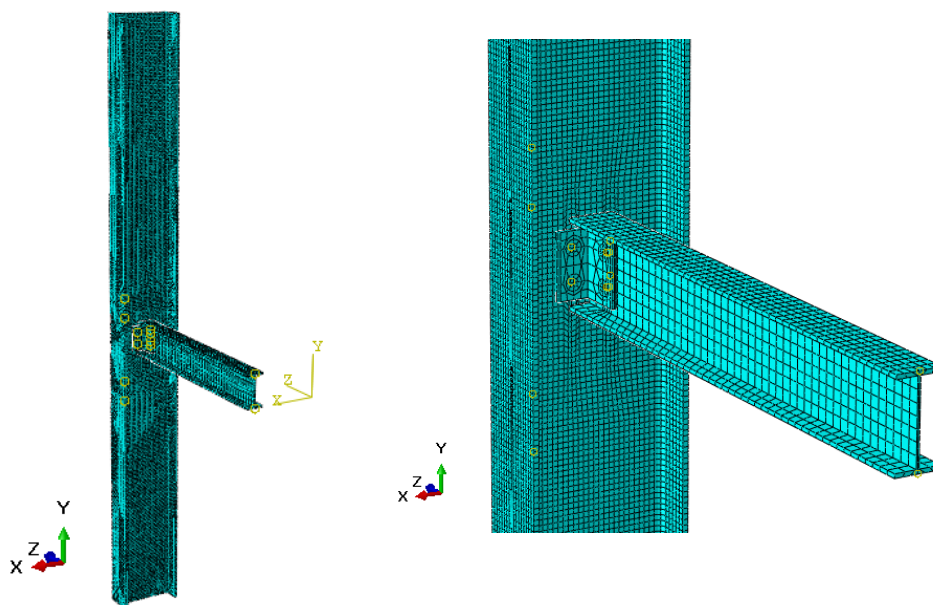


Figura 85: Perspetivas da ligação no Modelo 5.

**4.15. Modelo 6**

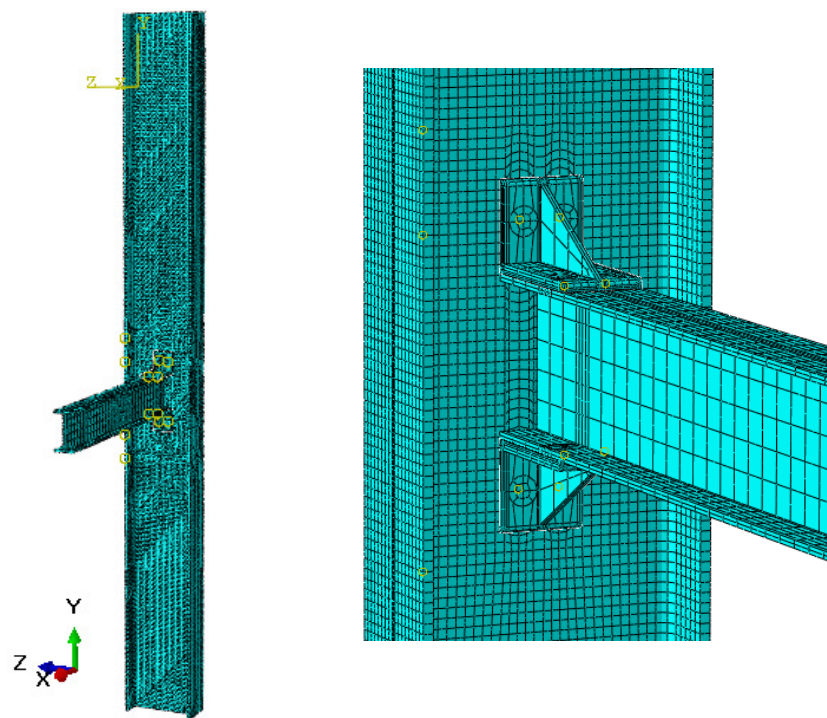


Figura 86: Perspetivas da ligação no Modelo 6.

**4.16. Modelo 7**

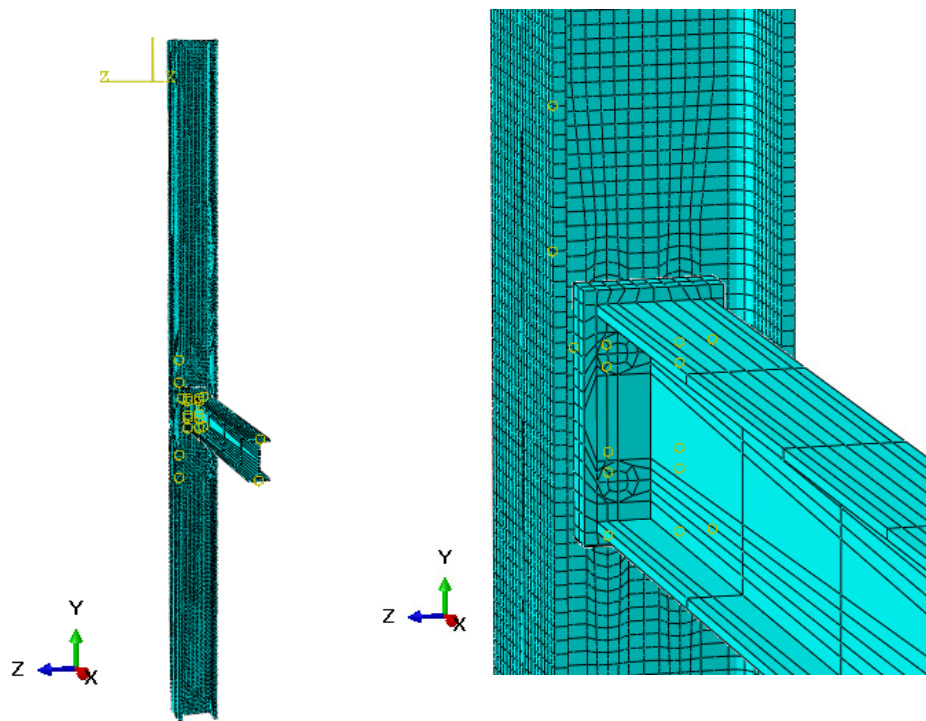


Figura 87: Perspetivas da ligação no Modelo 7.

**4.17. Modelo 8**

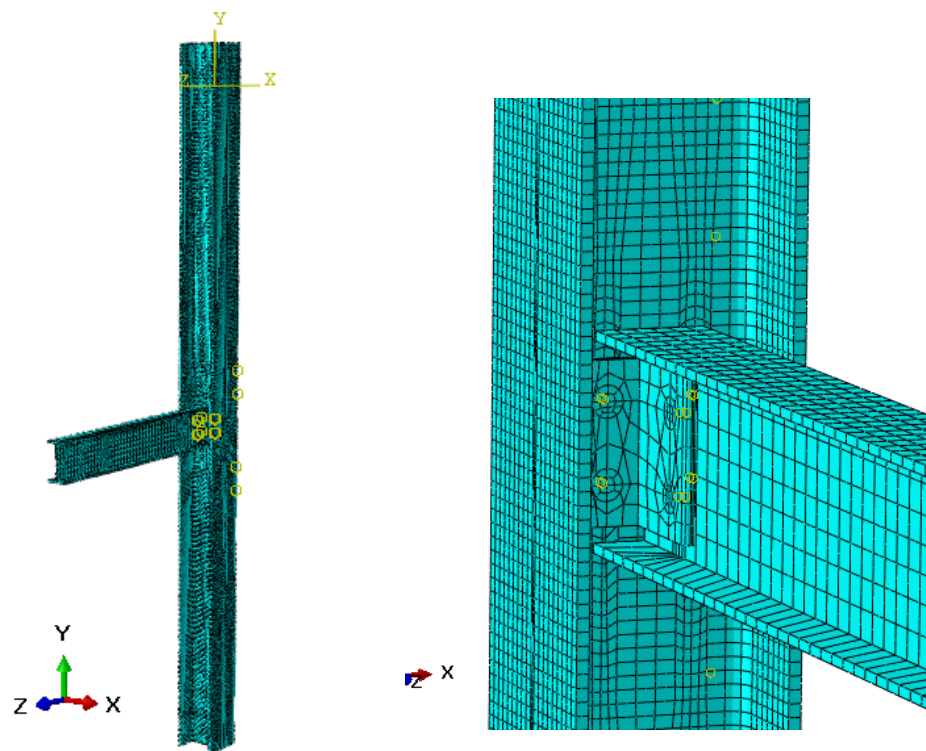


Figura 88: Perspetivas da ligação no Modelo 8.

**4.18. Modelo 9**

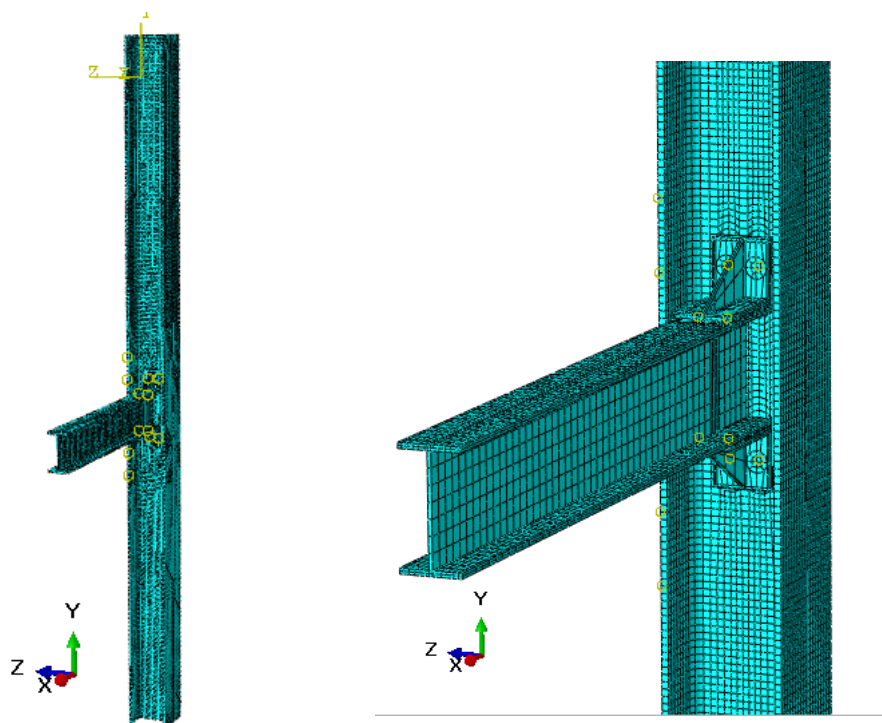


Figura 90: Perspetivas da ligação no Modelo 9.



**4.19. Modelo 10**

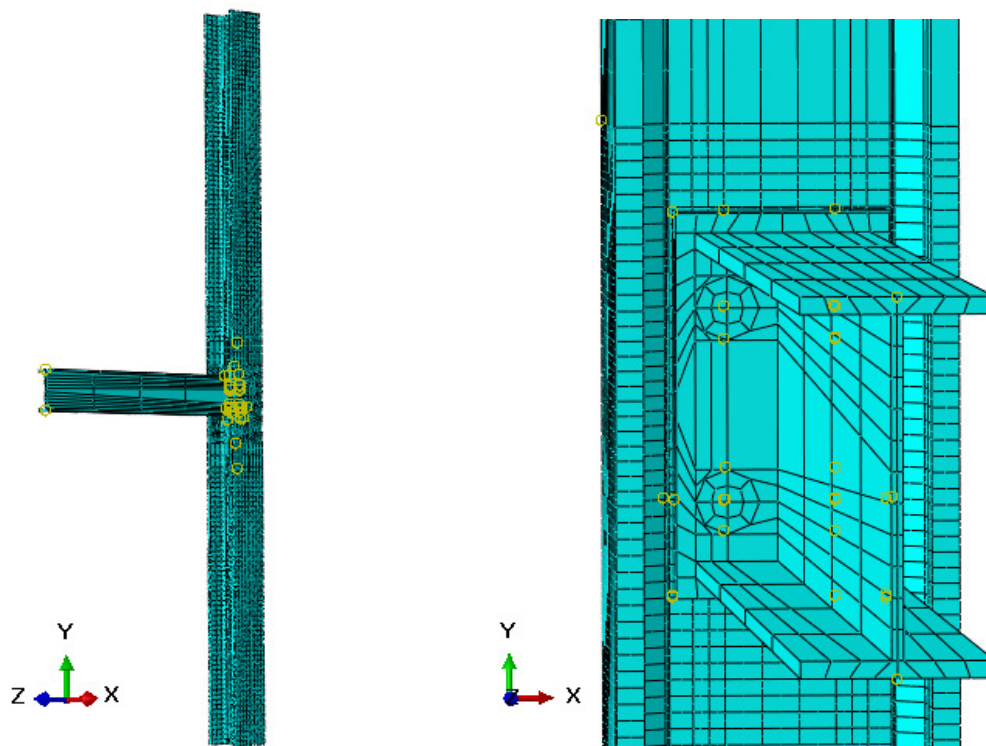


Figura 91: Perspetivas da ligação no Modelo 10.

**4.20. Modelo 11**

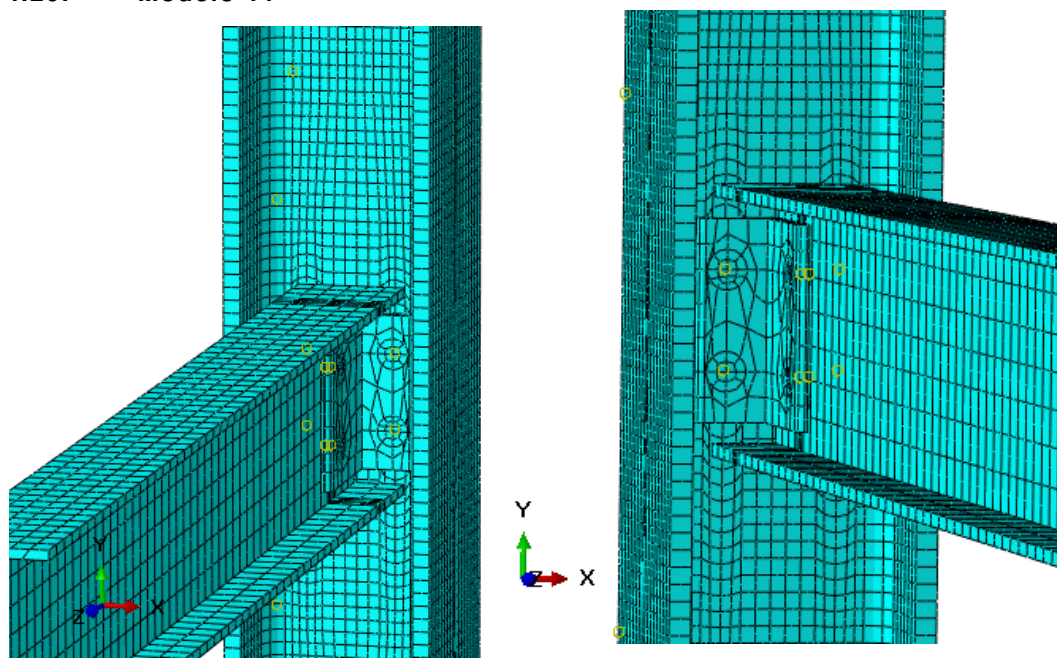


Figura 89: Perspetivas da ligação no Modelo 11.

4.21. Modelo 12

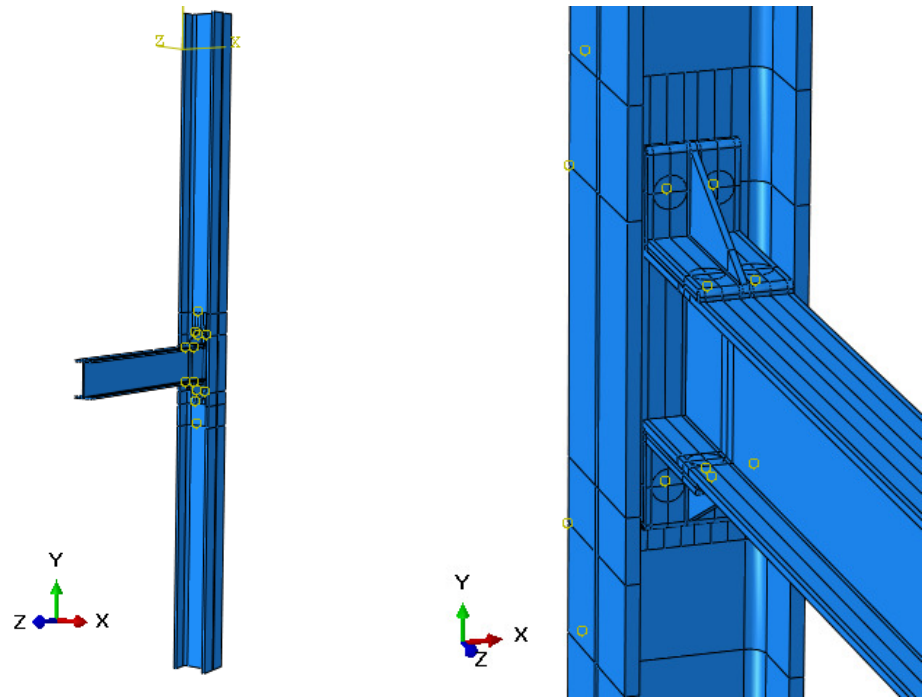


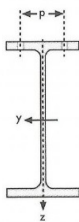
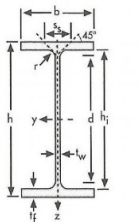
Figura 90: Perspectivas da ligação no Modelo 12.

4.22. Características dos elementos analisados

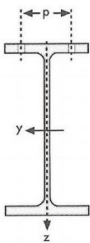
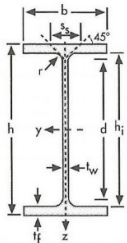
Neste sub-capítulo, apresentam-se as características geométricas e mecânicas dos perfis utilizados na composição dos modelos de estudo. São apresentados todos os perfis das vigas e pilares dos modelos.

Quadro 5: Características do perfis utilizados.

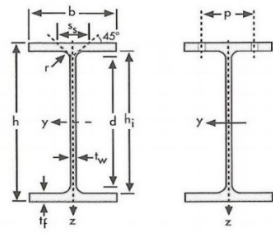
IPE							
Perfil	Gkg/m	Dimensões					A cm <sup>2</sup>
		h mm	b mm	t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm	r mm	
IPE 160	15,8	160	82	5,0	7,4	9	20,09
IPE 240	30.7	240	120	6.2	9.8	15	39.12
IPE 300	42,2	300	150	7,1	11	15	53,8



HEA							
Perfil	Gkg/m	Dimensões					A cm<sup>2</sup>
h mm	b mm	t<sub>w</sub> mm	t<sub>f</sub> mm	r mm			
HEA 180	35,5	171	180	6,0	9,5	15	45,25



HEB							
Perfil	Gkg/m	Dimensões					A cm <sup>2</sup>
		h mm	b mm	t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm	r mm	
HEA 180	42,6	160	160	8,0	13	15	54,25



## 5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Finalizados todos os trabalhos de modelação, foram simulados os doze modelos, para estudar o comportamento da zona da ligação. Numa primeira série, os modelos foram sujeitos a um aumento do carregamento, à temperatura ambiente, de modo a perceber qual a influência do tipo de ligação e qualidade do aço têm nas deformações ocorridas. Numa segunda fase, foram corridos novamente todos os modelos, com uma aplicação de 30% da carga de rotura a frio, para depois ser aplicada uma ação térmica, constituída por uma rampa de aquecimento até 500°C, que se manteve constante, até novamente um novo step de carga, com aumento da carga aplicada na extremidade das vigas, levando o provete até à rotura

### 5.1. Efeitos da carga aplicada com e sem ação térmica

No presente subcapítulo são apresentados sob a forma de gráfico a correlação entre a força aplicada e os consequentes deslocamentos, bem como a visualização das tensões Von Mises nos instantes do final das simulações.

Conforme pode ser observado pelos gráficos seguintes, verificou-se de uma forma geral, uma redução significativa da rigidez da ligação, que se manifesta pela menor inclinação das curvas Força-Deslocamento, para as simulações a 500°C.

Também se verificou de uma redução significativa da carga de rotura, bem como respetivo deslocamento, fazendo com que as curvas correspondentes aos ensaios a 500°C sejam em quase todos os ensaios de menor extensão que as curvas para os ensaios à temperatura ambiente como era de esperar.

O momento do término de cada ensaio assume-se que é definido por um aumento brusco da deformação, típico da rotura da ligação, tendo o programa abortado nesse instante, e sido considerada essa a carga de rotura.

Para a simulação de todos os modelos, a carga foi aplicada a uma distância de 1,00m da ligação, e os deslocamentos medidos no mesmo ponto.

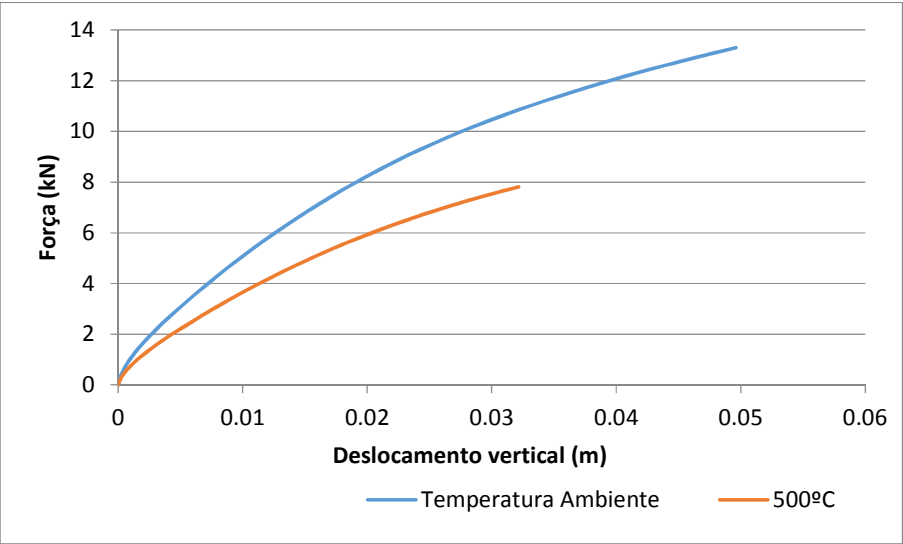


Gráfico 6: Força-deslocamento modelo 1.

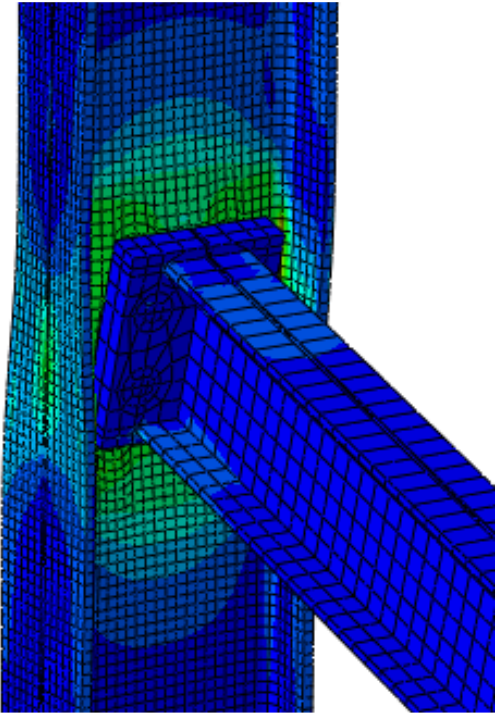
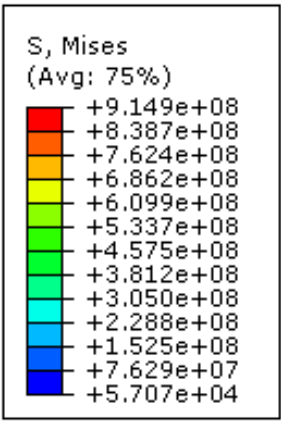


Figura 94- Deformação à temperatura ambiente do Modelo 1

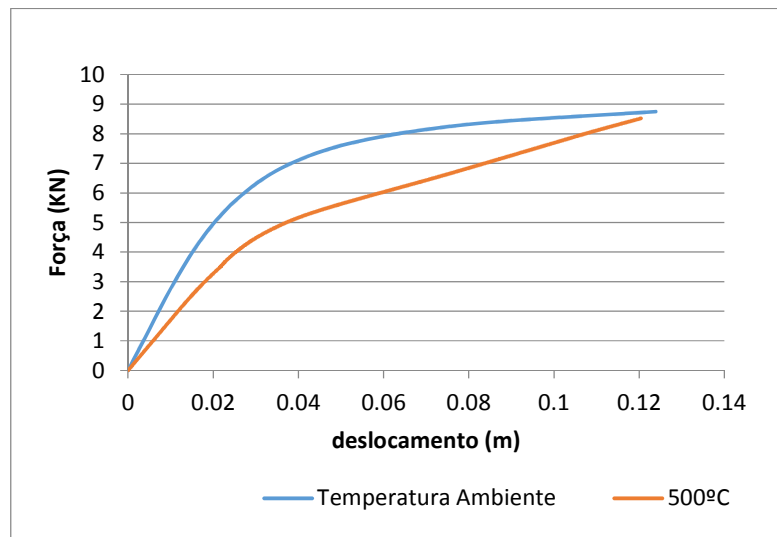


Gráfico 7: Força-deslocamento modelo 2.

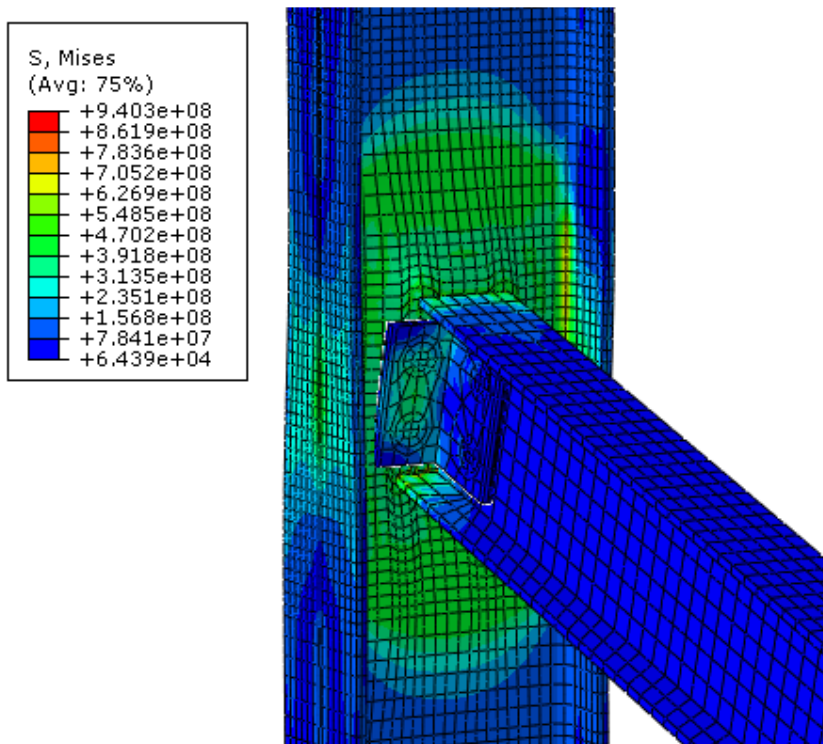


Figura 95 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 2

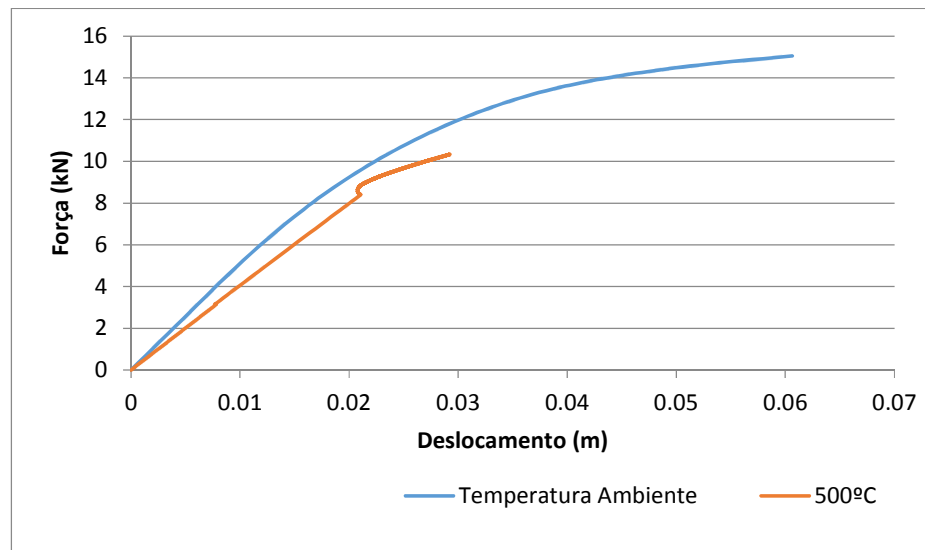


Gráfico 8: Força-deslocamento modelo 3.

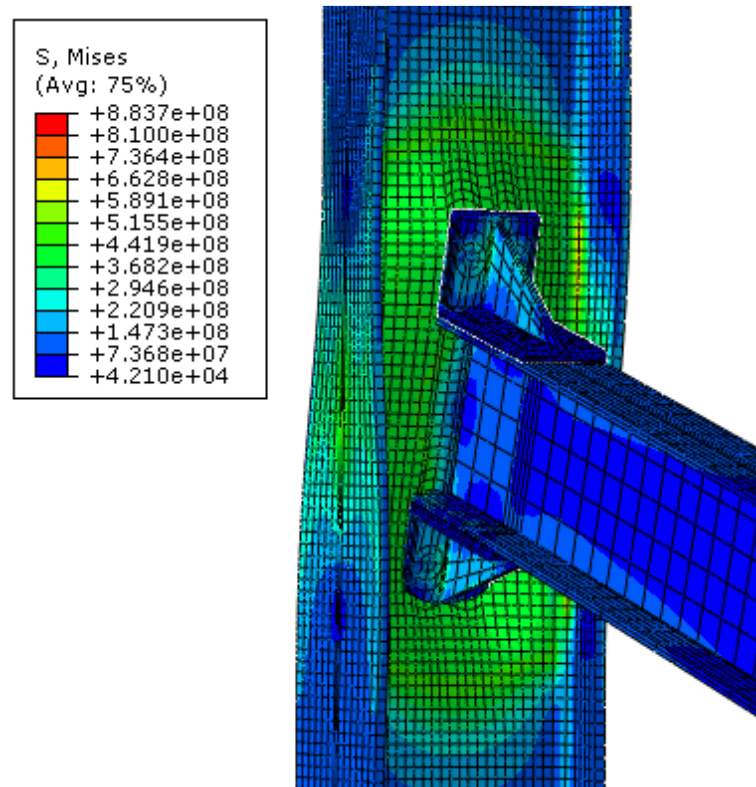


Figura 96 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 3



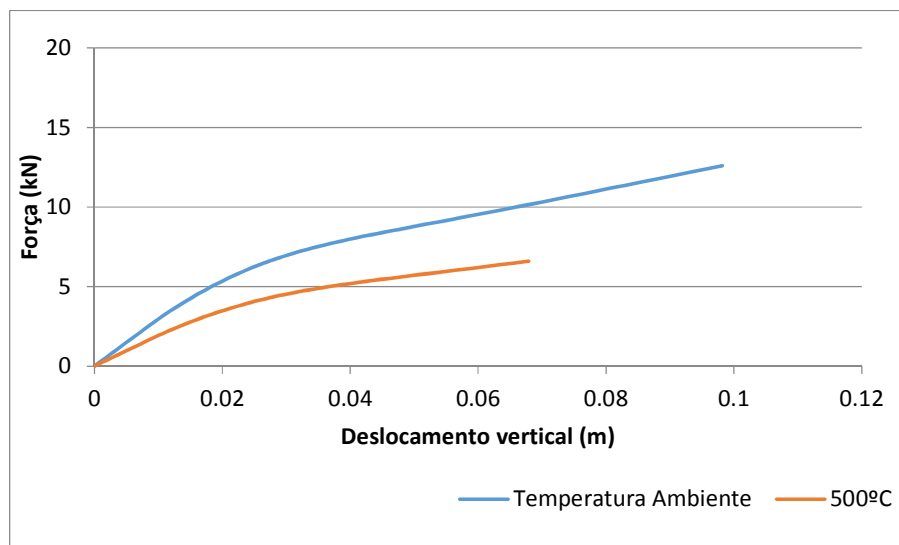


Gráfico 9: Força-deslocamento modelo 4

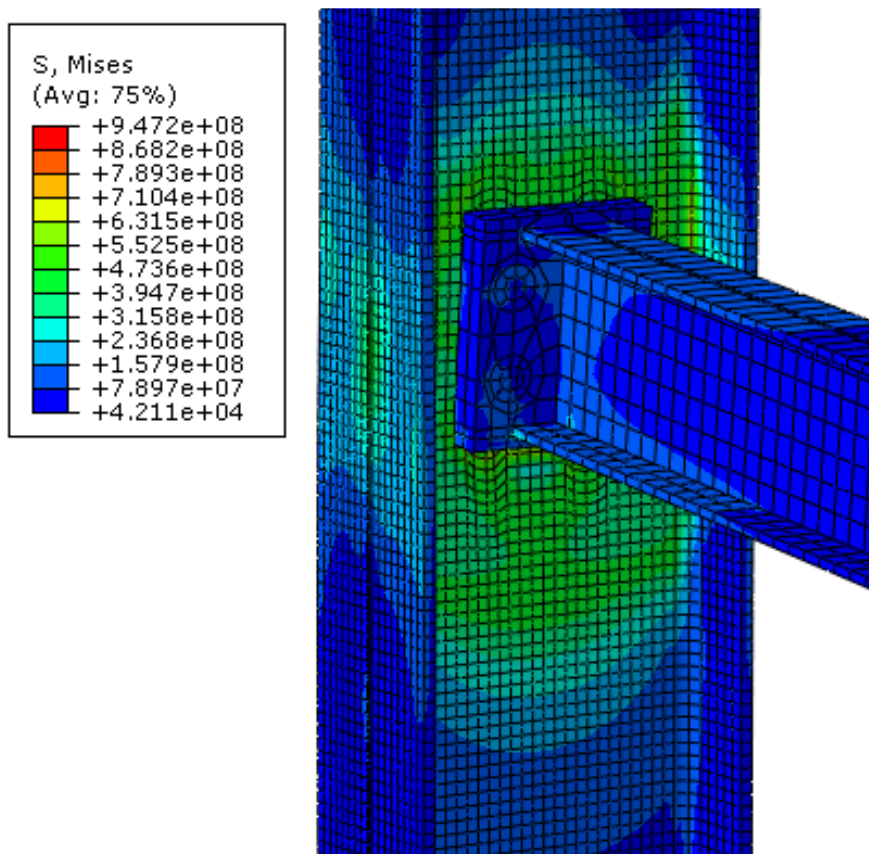


Figura 97 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 4

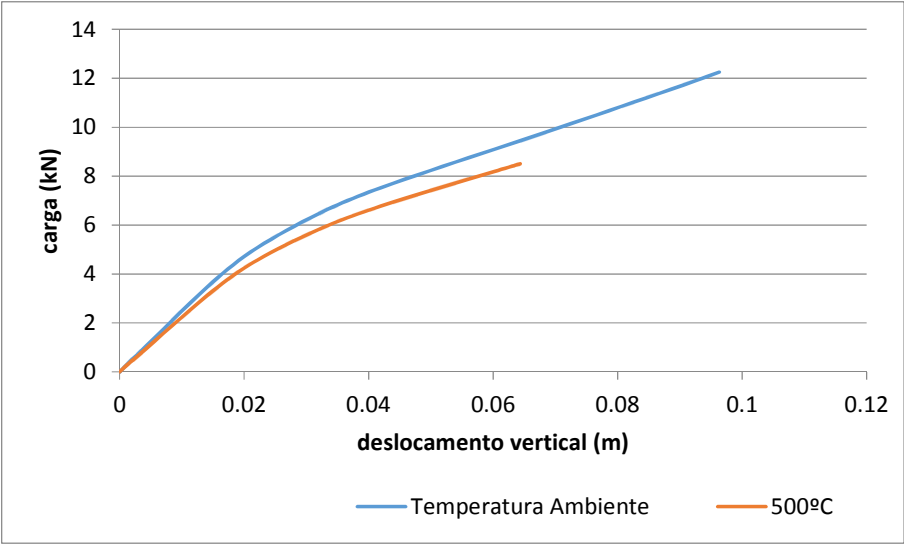


Gráfico 10: Força-deslocamento modelo 5.

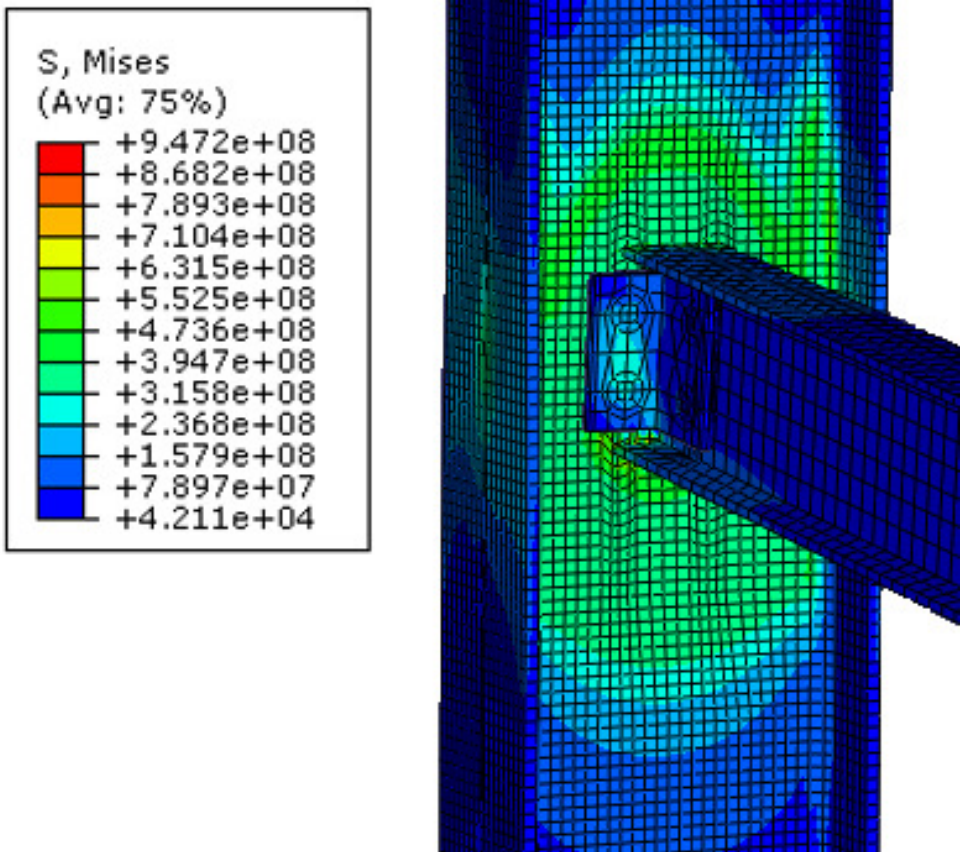


Figura 98 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 5



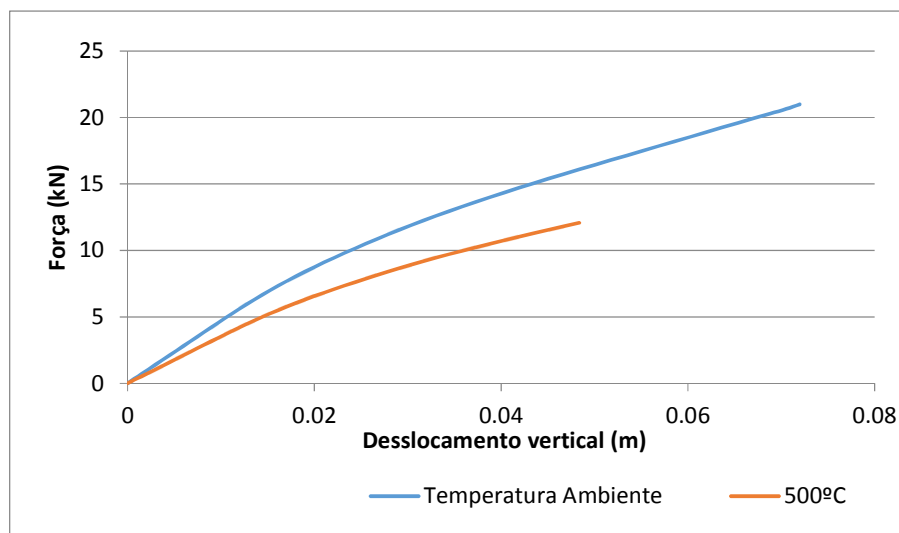


Gráfico 11: Força-deslocamento modelo 6.

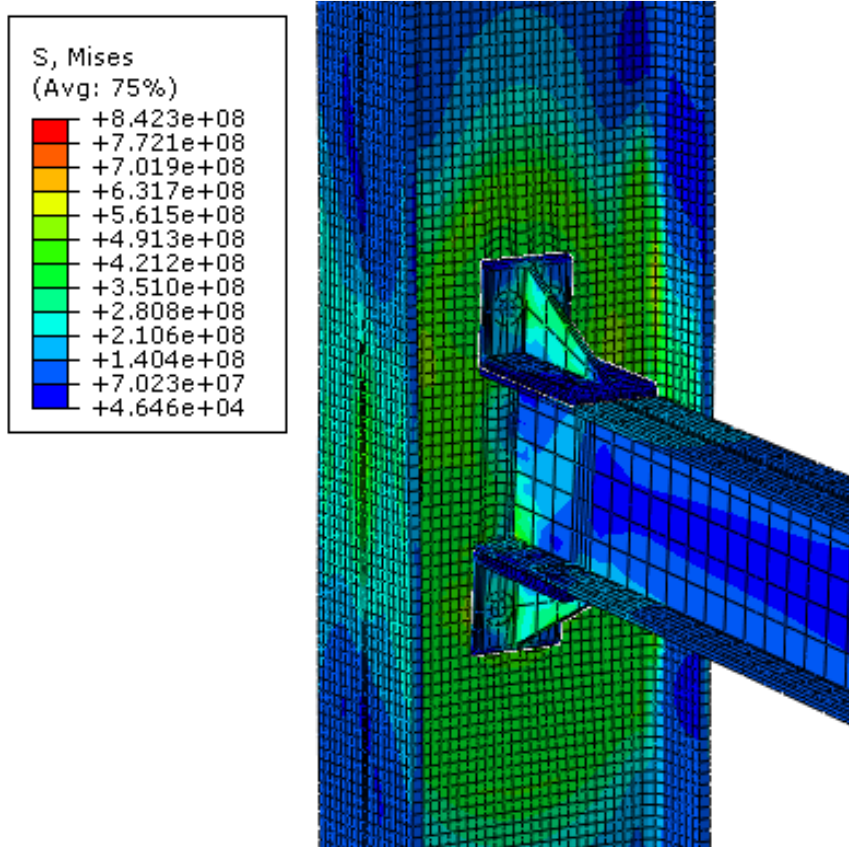


Figura 99: Deformação à temperatura ambiente do Modelo 6

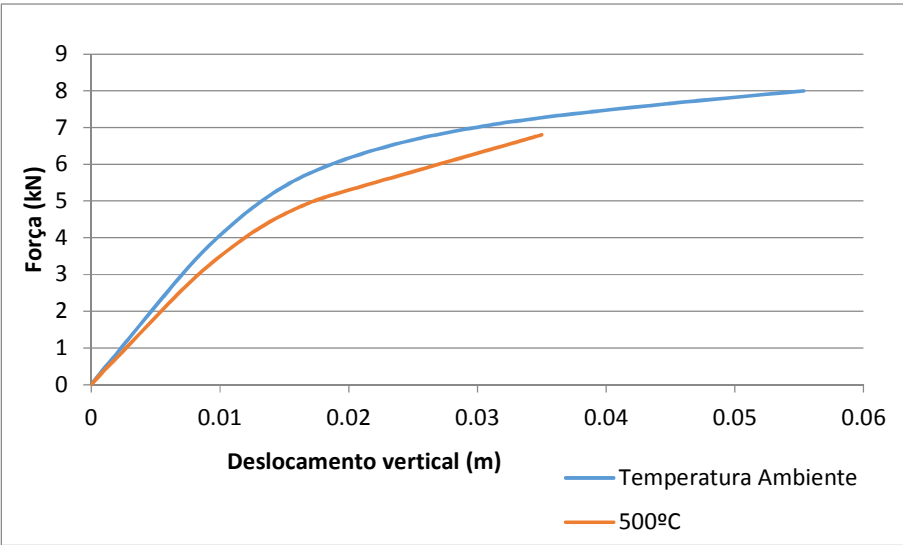
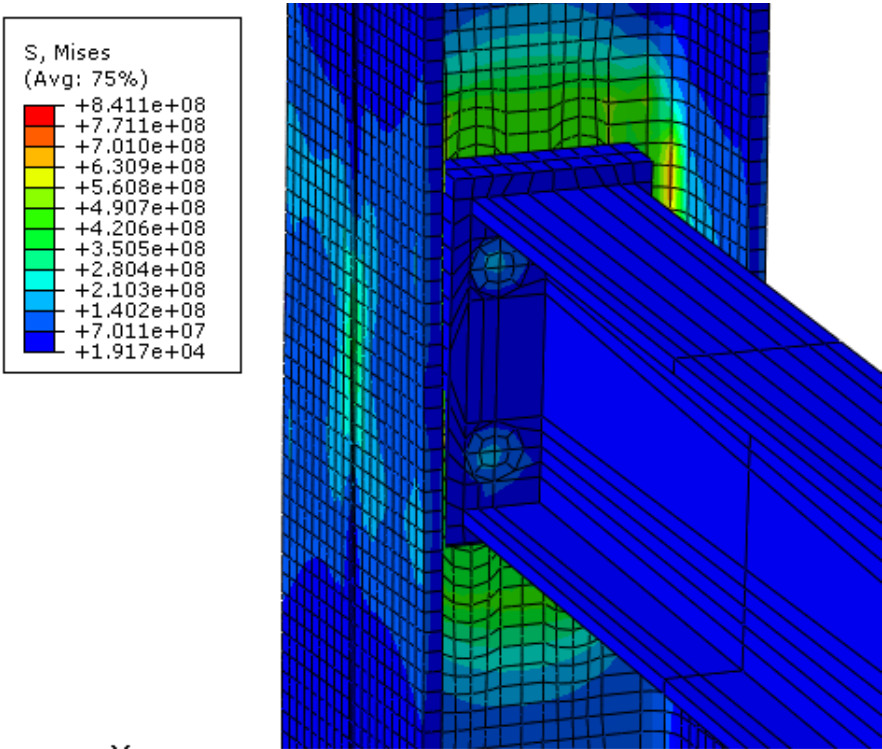


Gráfico 12: Força-deslocamento modelo 7.



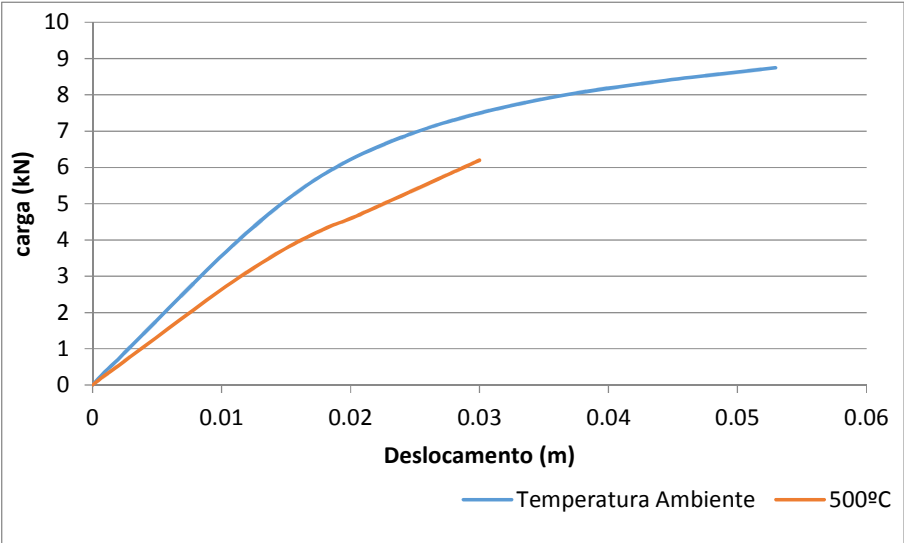


Gráfico 13: Força-deslocamento modelo 8.

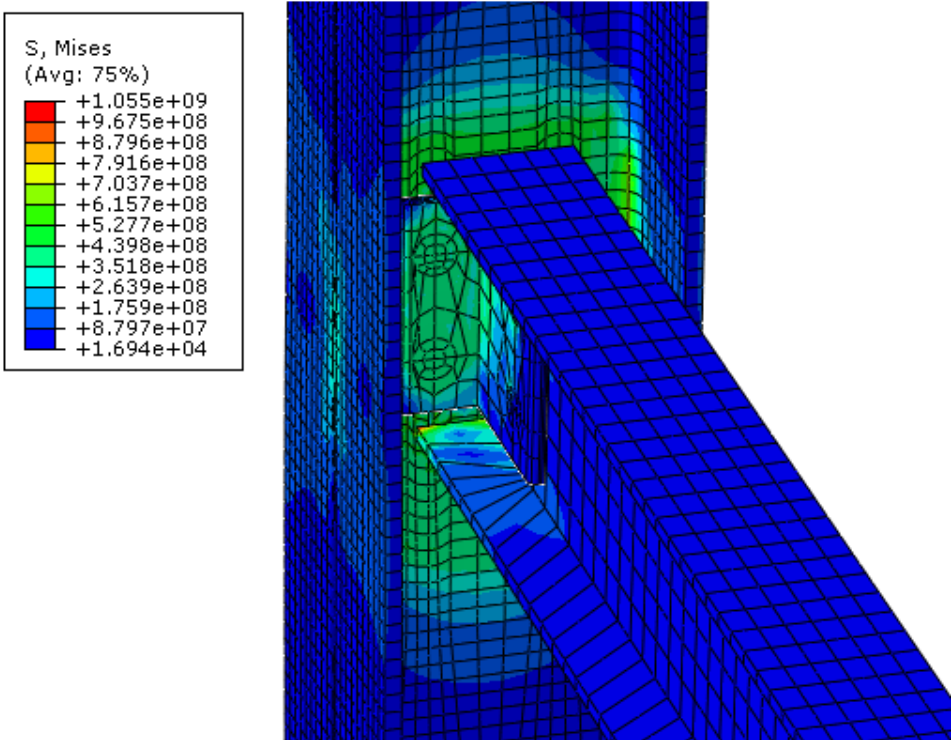


Figura 101 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 8

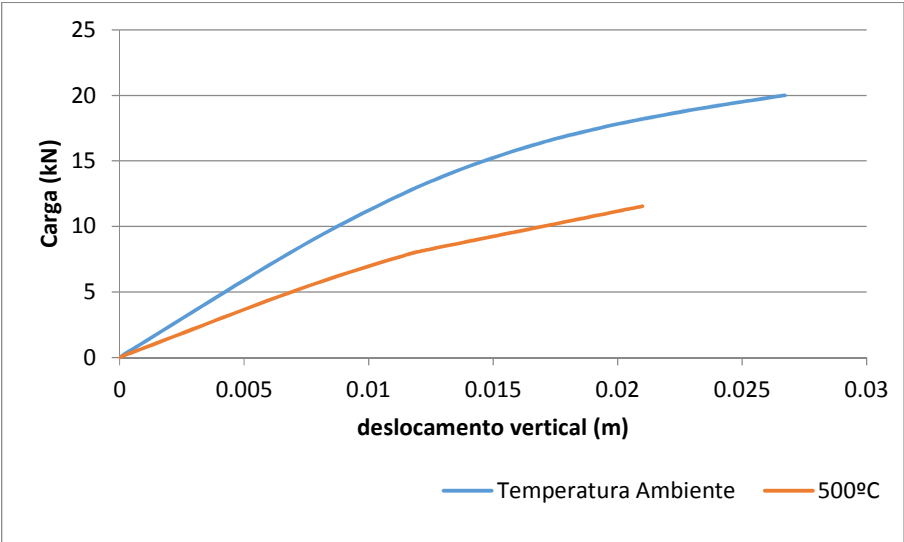


Gráfico 14: Força-deslocamento modelo 9.

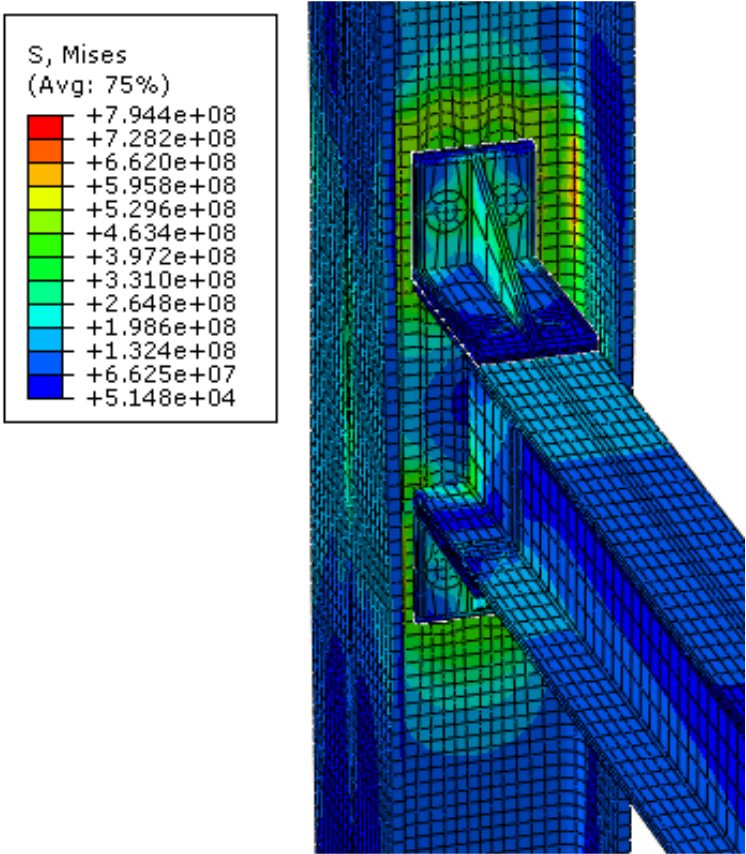


Figura 102 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 9

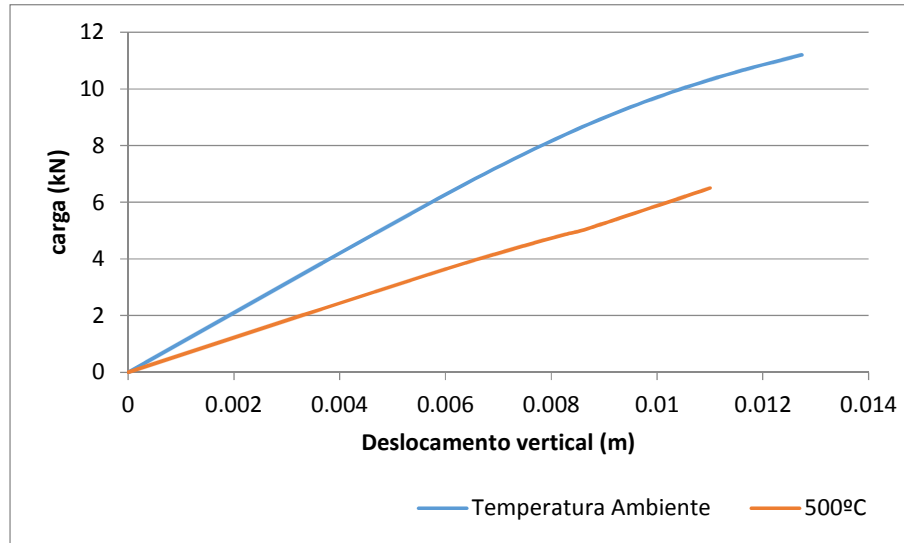


Gráfico 15: Força-deslocamento modelo 10.

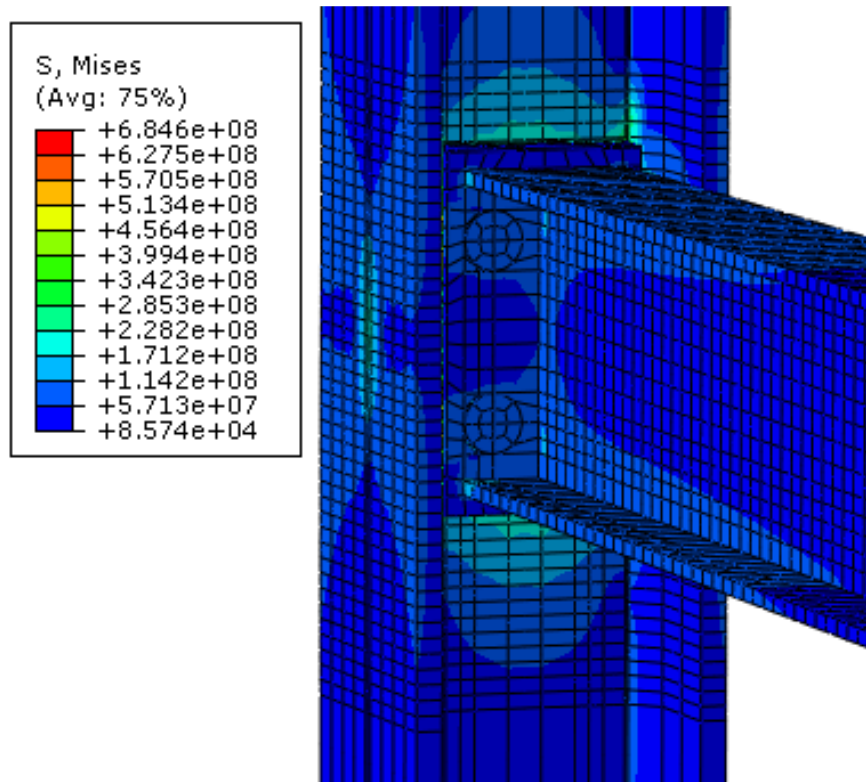


Figura 103 – Deformação à temperatura ambiente do Modelo 10

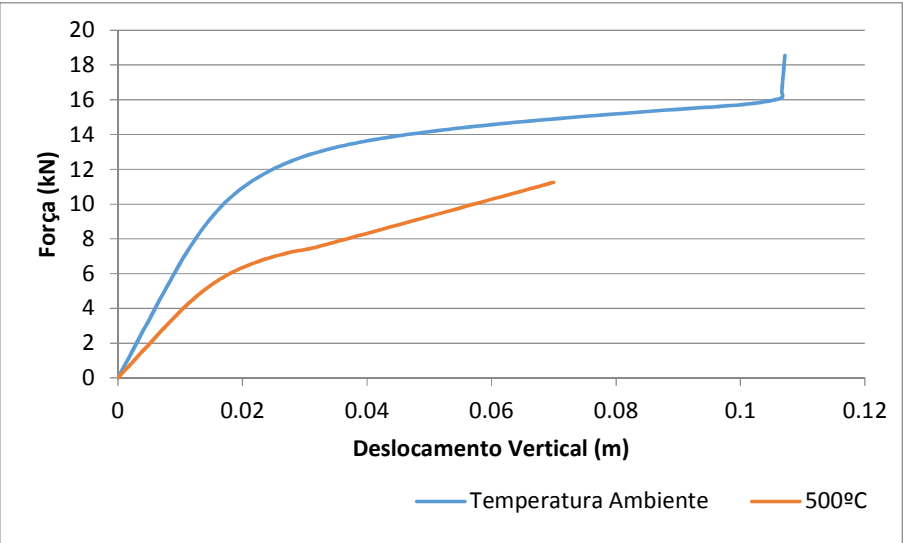


Gráfico 16: Força-deslocamento modelo 11.

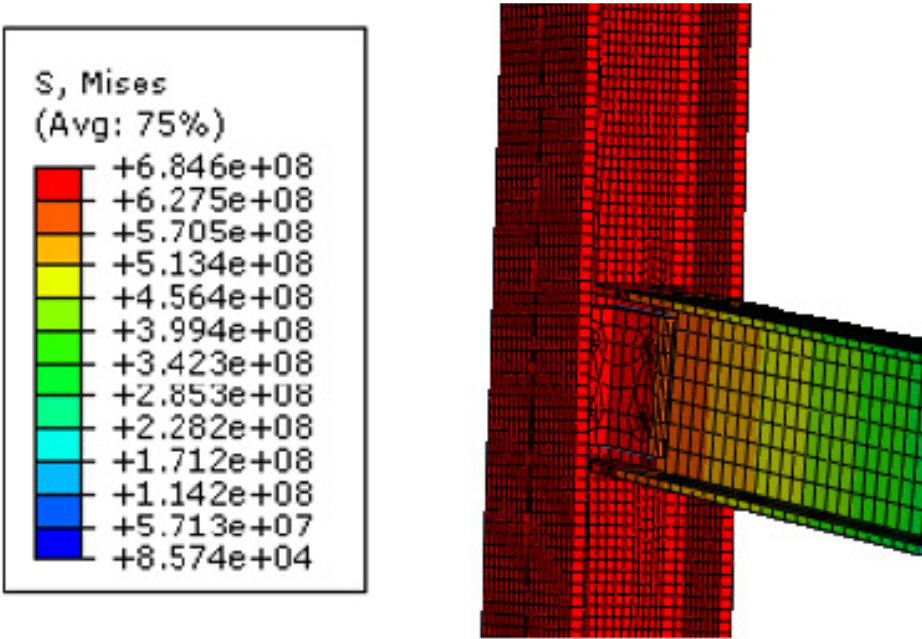


Figura 104 – Deformação à temperatura ambiente do Modelo 11

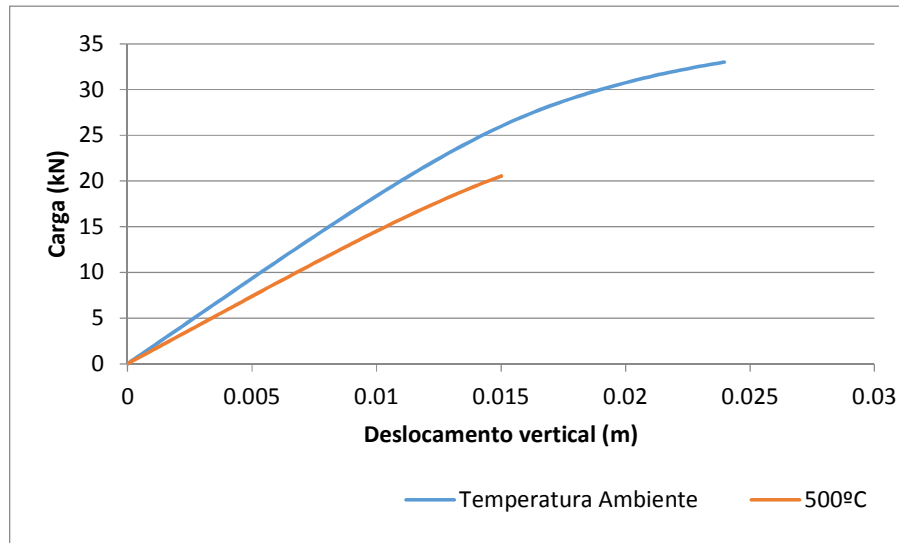


Gráfico 17: Força-deslocamento modelo 12.

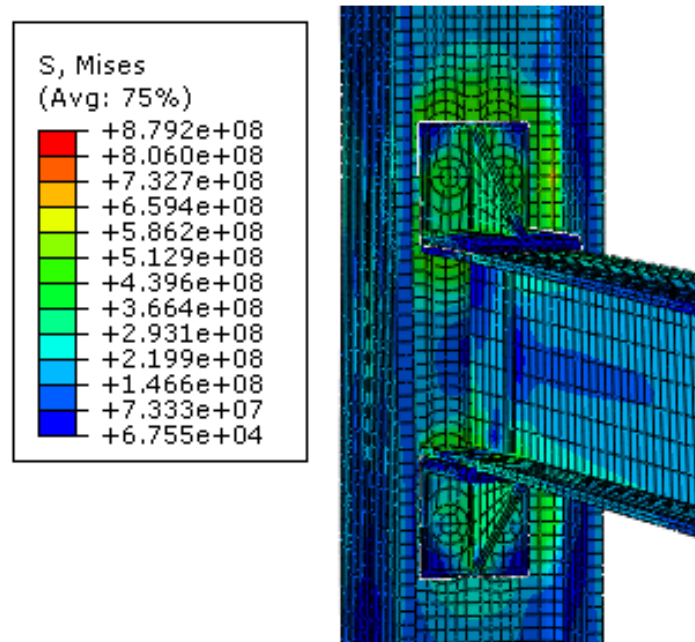


Figura 105 - Deformação à temperatura ambiente do Modelo 12

## 5.2 Conclusões

Deste trabalho, conclui-se que de uma maneira geral, as ligações quando expostas à ação de altas temperaturas, vão apresentar cargas de rotura menores, e rigidezes também bastante

inferiores. Neste trabalho foram estudadas apenas cargas de rotura para temperaturas constantes de 500°C, mas deveriam também ser experimentadas situações de aquecimento até 700°C.

Apesar de vários casos de ligação terem sido ensaiados, não foi possível encontrar um padrão de comportamento das ligações, não sendo possível com tão reduzido número de casos, estudar tão grande variabilidade de soluções.

Como proposta de estudos futuros, recomenda-se estudar mais modelos com diferentes perfis na viga e no pilar, para cada tipologia de ligação, para se poderem tirar conclusões mais representativas de cada tipo de ligação, ou seja, realizar um estudo paramétrico.

Também se poderá ter em conta em futuros trabalho neste tema, o fenómeno do endurecimento do aço, que não foi considerado neste estudo. Apenas se tiveram em conta as propriedades mecânicas do aço a altas temperaturas.



## Bibliografia

- ABAQUS. (2000). ABAQUS/CAE User's Manual. Hibbit, Karlsson and Sorenson, Inc.
- ABAQUS (2007). <http://www.egr.msu.edu/software/abaqus/Documentation/docs/>. Dassault Systèmes - Abaqus Version 6.7 Documentation.
- Agarwal, A. e Varma, H.A. (2014). Fire induced progressive collapse of steel building structures: The role of interior gravity columns. *Engineering Structures*, Vol. 58, pp. 129-140.
- Ahonen, A., Kokkala, M. e Weckman, H. (1984). Burning Characteristics of Potential Ignition Sources of Room Fires. Technical Research Centre of Finland, Espoo.
- AL-JABRI, K., SEIBI, A., & KARRECH, A. (2006). Modelling of unstiffened flush endplate bolted connections in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 151–159.
- ASCE (2010). ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Estados Unidos da América.
- ALLAM, A., BURGESS, I., & PLANK, R. (2002). Performance-based simplified model for a steel beam at large deflection in fire. *Proceedings of the 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*. Melbourne, Australia.
- Babrauskas, V. (1997). Glass breakage in fires.
- Babrauskas, V. e Peacock, R.D. (1992). Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard. *Fire Safety Journal*, Vol. 18, Issue 3, pp. 255-272.
- Bailey, C.G., Lennon, T. e Moore, D.B. (1999). The behaviour of full-scale steel-framed buildings subjected to compartment fires. *The Structural Engineer*, Vol. 77, Issue 8, pp. 15-21.
- Baryllick, J. (2012). *Killer Show: The Station Nightclub Fire, America's Deadliest Rock Concert*. University Press of New England, Lebanon. ISBN-13 978-1611682656.
- Beata, P.A. e Jeffers, A.E. (2014). 3D spatial homogenization algorithm for coupling CFD fire simulations with finite element heat transfer analyses of structures. *Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire*, Xangai.
- Benichou, N. (2002). 82.579 Design for Fire Resistance. Department of Civil & Environmental Engineering, Universidade de Carleton, Ottawa.
- Brazão Farinha, J.S. e Correia dos Reis, A. (1993). *Tabelas Técnicas*. Edição P.O.B., Setúbal.
- British Steel PLC (1999). *The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire*. British Steel PLC, Swinden Technology Centre, Rotherham.
- Buchanan, A.H. (2001). *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. ISBN 978-0-471-89060-7.
- BURGESS, I. e. (2012). The Role of Connections in the Response of Steel Frames to Fire. *Structural Engineering International*, 449-461.
- BURGESS, I. W., EL-RIMAWI, J., & PLANK, R. J. (1991). Studies of the Behaviour of Steel Beams in Fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 285-312.

- Caldas, R.B. (2008). Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Caldas, R.B., Fakury, R.H., Sousa Jr., J.B.M. e Pannoni, F.D. (2006). A Utilização de Métodos Avançados de Cálculo para a Análise de Pisos Mistos de Aço e Concreto em Situação de Incêndio. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas
- Caldas, R.B., Rodrigues, F.C., Marinho, A.C.B. e Fakury, R.H. (2010). Simulação Computacional do Comportamento de um Incêndio Real em um Apartamento de Edificação Popular. Nono Simpósio de Mecânica Computacional, São João del Rei.
- Capote Abreu, J.A., Alvear Portilla, D., Lázaro Urrutia, M. e Espina Santos, P. (2005). Dinamica del Incendio en Edificios mediante Modelado y Simulación Computacional: CFAST, OZONE, FDS. Grupo GIDAI - Seguridad contra Incendios - Investigación y Tecnología.
- Cécile Haremza, (2014). ROBUSTNESS OF OPEN CAR PARKS UNDER LOCALISED FIRE. Tese de Doutorado em Construção Metálica e Mista, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- Chew, M.Y.L. (1999). HRR, smoke and toxicity of ceiling and wall linings and finishes. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 1, Number 3, pp. 204-212.
- Choi, J. (2008). Concurrent Fire Dynamics Models and Thermomechanical Analysis of Steel and Concrete Structures. Dissertação de Doutorado, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Correia, A.M. (2011). Fire Resistance of Steel and Composite Steel-Concrete Columns. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Correia, A.M., Rodrigues, J.P.C. e Silva, V.P. (2010). Numerical Study on the Behavior of Steel Columns Embedded on Brick Walls Subjected To Fire. International Symposium "Steel Structures: Culture & Sustainability 2010", Istambul.
- Correia, A.M., Rodrigues, J.P. e Vila Real, P. (2012). Parametric Study on the Behaviour of Steel Columns Embedded on Walls. Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire, Zurique.
- Costa, C.N. (2008). Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CYPE Ingenieros, S.A. (2013). Cypecad - Memória de Cálculo, Braga.
- Dassault Systèmes (2012). Abaqus 6.12 - Abaqus/CAE User's Manual, Providence.
- Dassault Systèmes (2012). Abaqus 6.12 - Getting Started with Abaqus: Interactive Edition, Providence.
- Dolvitsch, J.N., Ruschel, F. e Silva Filho, L.C.P. (2011). Avaliação da Utilização de Métodos Computacionais na Reconstituição de Incêndios em Edificações: Caso do Shopping Total em Porto Alegre - Rio Grande do Sul. Anais: I Congresso Ibero-Latino Americano sobre Segurança Contra Incêndio, Natal.

- El-Dardiry, E. e Ji, T. (2006). Modelling of the dynamic behaviour of profiled composite floors. *Engineering Structures*, Vol. 28, Issue 4, pp. 567-579.
- Ellingwood, B.R., Smilowitz, R., Dusenberry, D.O., Duthinh, D. e Carino, N.J. (2007). NISTIR 7396: Best Practices for Reducing the Potencial for Progressive Collapse in Buildings. Washington, D. C., National Institute of Standards and Technology (NIST).
- Engineering ToolBox (2015). <http://www.engineeringtoolbox.com>. The Engineering ToolBox - Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications.
- Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço : Parte 1-2 - Regras Gerais – Verificação da resistência ao fogo. (Março de 2010). NP EN 1993-1-2 : 2010. Caparica: IPQ.
- FEMA (2014). Practical Applications of Fire Dynamics and Modeling - Student Manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D. C.
- Forney, G.P. (2014). Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume I: User's Guide - Version 6.1.12.
- Foster, S., Chladná, M., Hsieh, C., Burgess, I. e Plank, R. (2007). Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire. *Fire Safety Journal*, Vol. 42, Issue 3, pp. 183-199.
- Fu, F. (2009). Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, Issue 6, pp. 1269-1278.
- Fu, F. (2015). Advanced Modelling Techniques in Structural Design. John Wiley & Sons, Ltd., Londres. ISBN 978-1-118-82543-3.
- Gales, J., Maluk, C. e Bisby, L. (2012). Structural Fire Testing - Where are we, how did we get here, and where are we going? 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto.
- Gann, G.R., Hamins, A., McGrattan, K.B., Mulholland, G.W., Nelson, H.E., Ohlemiller, T.J., Pitts, W.M. e Prasad, K.R. (2005). NIST NCSTAR 1-5: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Reconstruction of the Fires in the World Trade Center Towers. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- Garlock, M., Kruppa, J., Li, G.-Q. e Zhao, B. (2014). White Paper on Fire Behavior of Steel Structures (Draft). National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- Gentili, F., Grossi, L. e Bontempi, F. (2011). Role of CFD in the Quantitative Assessment of Structural Performance in Fire Scenarios. Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering, Praga.
- Glaser, J., Valasek, L., Weisenpacher, P. e Halada, L. (2012). Use of PyroSim for Simulation of Cinema Fire. *International Journal on Recent Trends in Engineering & Technology*, Vol. 7, Issue 2, pp. 51- 56.
- Grosshandler, W. (1993). NIST Technical Note 1402 - RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment, Gaithersburg.
- Grosshandler, W., Bryner, N., Madrzykowski, D. e Kuntz, K. (2005). NIST NCSTAR 2: Vol. I - Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.

- Haberland, M. e Starossek, U. (2009). Progressive Collapse Nomenclature. Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role, Austin.
- Hietaniemi, J., Mangs, J. e Hakkarainen, T. (2001). Burning of Electrical Household Appliances: And Experimental Study. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo.
- Hurtado, J.P., Caldas, R.B., Rodrigues, F.C. e Meira, L.O. (2013). Simulação Computacional de um Incêndio em Edificação Residencial de Baixo Custo. Atas do 2º Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança Contra Incêndios, Coimbra.
- ISO (1999). ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. International Organization for Standardization, Genebra.
- Iwankiw, N. (2006). Segmentation of Analysis/Design Levels for Structural Fire Engineering. Proceedings of the Fourth International Workshop - Structures in Fire, Volume 2, Aveiro.
- Jahn, W., Rein, G. e Torero, J.L. (2007). The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling - 11 A Posteriori Modelling of Fire Test One. School of Engineering and Electronics, Universidade de Edimburgo, Edimburgo. ISBN 978-0-9557497-0-4.
- Jahn, W., Rein, G. e Torero, J.L. (2011). A posteriori modelling of the growth phase of Dalmarnock Fire Test One. Building and Environment, Vol. 46, pp. 1065-1073.
- Jowsey, A., Torero, J.L., Usmani, A., Lane, B. e Lamont, S. (2005). Determination of Fire Induced Collapse Mechanisms of Multi-Storey Steel Framed Structures - A Case Study. EUROSTEEL 2005: 4th European Conference on Steel and Composite Structures, Maastricht.
- Kim, J., Lee, J.-H. e Kim, S. (2011). Estimating the fire behavior of wood flooring using a cone calorimeter. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 110, Issue 2, pp. 677-683.
- Kolaitis, I.D., Asimakopoulou, E. e Founti, M.A. (2011). Simulation of Fire Spreading in a Residential Building: Comparing Alternative Building Techniques. First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Dubai.
- Lange, D., Röben, C. e Usmani, A. (2012). Tall building collapse mechanisms initiated by fire: Mechanisms and design methodology. Engineering Structures, Vol. 36, pp. 90-103.
- LAWSON, R. (1990). Behaviour of Steel Beam-to-Column Connections in Fire. Em The Structural Engineer (pp. 263-271). London, UK.
- LESTON-JONES, L. C. (1997). The influence of semi-rigid connections on the performance of steel framed structures in fire. PhD Thesis. University of Sheffield.
- Lilley, D.G. (2008). Fire Dynamics: A Practical Oriented Course for Safety Engineers. Second International Energy 2030 Conference - 2008 Proceedings, Abu Dabi.
- Lim, L.C.S. (2003). Membrane Action In Fire Exposed Concrete Floor Systems. Tese de Doutorado, Universidade de Canterbury, Christchurch.
- LIU, T. (1996). Finite element modelling of behaviour of steel beams and connections in fire. Journal of Constructional Steel Research, 181-199.
- LIU, T. (1999). Fire resistance of unprotected steel beams with moment connections. Journal of Constructional Steel Research, 61-77.

- LIU, T., FAHAD, M., & DAVIES, J. (2002). Experimental investigation of behaviour of axially restrained steel beams in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 1211–1230.
- Luo, C., Chen, L., Lua, J. e Liu, P. (2010). Abaqus Fire Interface Simulator Toolkit (AFIST) For Coupled Fire and Structural Response Prediction. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Orlando.
- MakeltFrom.com (2015). <http://www.makeitfrom.com/material-properties/High-Impact-Polystyrene-HIPS/>. High Impact Polystyrene (HIPS) Material Properties : MakeltFrom.com.
- Malendowski, M., Gglema, A., Kurzawa, Z. e Polus, L. (2013). Structural Response Under Natural Fire of Barrel Shape Shell Construction. *Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering*, Praga.
- Malendowski, M., Glema, A. e Szymkuc, W. (2014). Determination of the series of crucial fire scenarios for the skeletal structures. *Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire*, Xangai.
- Mariani, L.M. e Silva, L.C. (2011). Aplicação do Programa Fire Dynamics Simulator em Simulação de Incêndio Estrutural. *Anais: I Congresso Ibero-Latino Americano sobre Segurança Contra Incêndio*, Natal.
- McAllister, T.P., Gann, R.G., Averill, J.D., Gross, J.L., Grosshandler, W.L., Lawson, J.R., McGrattan, K.B., Pitts, W.M., Prasad, K.R. e Sadek, F.H. (2008). NIST NCSTAR 1-9: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Building 7. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- McGrattan, K., McDermott, R., Weinschenk, C. e Overholt, K. (2014). *Fire Dynamics Simulator - User's Guide - Version 6.1.2*, Baltimore.
- MOORE, D., & LENNON, T. (1997). Fire engineering design of steel structures. *Progress in Structural Engineering Materials*, 4-9.
- NFPA (2013). *NFPA Glossary of Terms*. National Fire Protection Association, Quincy. NIST (2005). NIST NCSTAR 1: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- NIST (2008). NIST NCSTAR 1A: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Final Report on the Collapse of World Trade Center Building 7. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- NIST (2011a). <http://fire.nist.gov/fire/fires/work2/work2.html>. National Institute of Standards and Technology - Engineering Laboratory - Two Panel Workstation Fire (página desativada; consultada através do arquivo da internet <http://web.archive.org>), Washington, D. C.
- NIST (2011b). <http://www.fire.nist.gov/fire/fires/work3/work3.html>. National Institute of Standards and Technology - Engineering Laboratory - Three Panel Workstation Fire (página desativada; consultada através do arquivo <http://web.archive.org>), Washington, D. C.

- NP EN 1991-1-2 (2010). Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções gerais, Acções em estruturas expostas ao fogo. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- NP EN 1992-1-2 (2010). Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- NP EN 1993-1-2 (2010). Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- NPL (2007). Manual for the Calculation of Elastic-Plastic Materials Models Parameters. National Physical Laboratory, Londres.
- Peacock, D.R., Reneke, P.A. e Forney, G.P. (2012). NIST Special Publication 1041r1: CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) - User's Guide.
- Polus, L., Szumigala, M., Kurzawa, Z. e Malendowski, M. (2013). CFD Modelling of the Braced Barrel Vault. Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering, Praga.
- Quiel, S.E. e Garlock, M.E.M. (2008). Modeling High-Rise Steel Framed Buildings under Fire. Structures Congress 2008: Crossing Borders, Vancouver.
- Quiel, S.E. e Garlock, M.E.M. (2010). Parameters for Modeling a High-Rise Steel Building Frame Subject to Fire. Journal of Structural Fire Engineering, Vol. 1, Issue 2, pp. 115-134.
- Quintana, J., Aurtenetxe, J., Morente, F. e Eguia, S. (2010). Restrained Steel Beam Behaviour in Case of Fire, Depending on Load Ratio, Performed in Case Study of a Bus Station. Structures in Fire - Proceedings of the Sixth International Conference, East Lansing.
- Quintiere, J.G. (2006). Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. ISBN-13 978-0-470-09113-5.
- RAHMAN, R., HAWILEH, R., & MAHAMID, M. (2004). The effect of fire loading on a steel frame and connection. Em High-performance structures and materials II (pp. 307–316). C.A. Brebbia & W.P. De Wilde.
- Rein, G. (2012). Introduction to Fire Dynamics for Structural Engineers. School of Engineering, Universidade de Edimburgo, Malta.
- Rein, G., Torero, J.L., Jahn, W., Stern-Gottfried, J., Ryder, N.L., Desanghere, S., Lázaro, M., Mowrer, F., Coles, A., Joyeux, D., Alvear, D., Capote, J.A., Jowsey, A., Abecassis-Empis, C. e Reszka, P. (2009). Round-Robin Study of a priori Modelling Predictions of The Dalmarnock Fire Test One. Fire Safety Journal, Vol. 44, Issue 4, pp. 590-602.
- Rein, G., Torero, J.L., Jahn, W., Stern-Gottfried, J., Ryder, N.L., Desanghere, S., Lázaro, M., Mowrer, F., Coles, A., Joyeux, D., Alvear, D., Capote, J.A., Jowsey, A. e Reszka, P. (2007). The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling - 10. A Priori Modelling of Fire Test One. School of Engineering and Electronics, Universidade de Edimburgo, Edimburgo. ISBN 978-0-9557497-0-4.
- RESENDE, V. (2009). Análise e dimensionamento de estruturas metálicas segundo o eurocódigo 3 – vantagens no uso de ligações semi-rígidas”.

- Särdqvist, S. (1993). Initial Fires: RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests. Department of Fire Safety Engineering, Institute of Technology, Universidade de Lund, Lund.
- SARRAJ, M. e. (2007). Finite Element Modelling of Fin Plate Steel Connections in Fire. *Fire Safety Journal*, 408-415.
- Sekret, R., Saleta, D., Sztarbala, G. e Smardz, P. (2013). Comparison of CFD Modelling with Fire Tests. *Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering*, Praga.
- Selamet, S. (2013). The impact of fire scenario to the collapse of a tall structure. *Proceedings of the Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cidade do Cabo.
- SFPE (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3ª Edição. Society of Fire Protection Engineers, Quincy. ISBN 087765-451-4.
- Sun, R., Burgess, I.W. e Huang, Z. (2012). The collapse behaviour of braced steel frames exposed to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 72, pp. 130-142.
- T.C. Forensic (2015). <http://www.tcforensic.com.au/docs/article10.html>. T.C. Forensic: Article 10 - Physical Constants for Investigators.
- Thunderhead Engineering (2014). *PyroSim User Manual*.
- Tondini, N., Morbioli, A., Vassart, O., Lechêne, S. e Franssen, J.-M. (2014). An integrated modelling strategy between FDS and SAFIR: the analysis of the fire performance of a composite steelconcrete open car park. *Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire*, Xangai.
- Tondini, N., Vassart, O. e Franssen, J.-M. (2012). Development of an Interface Between CFD and FE software. *Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire*, Zurique.
- Tonicello, E., Desanghere, S., Vassart, O. e Franssen, J.-M. (2012b). Fire Analysis of a New Steel Bridge. *Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire*, Zurique, 815-822.
- Tonicello, E., Vassart, O., Zanon, R. e Franssen, J.-M. (2012a). Structural Fire Design and Optimisation of a Building. *Structural Engineering International*, Vol. 22, Issue 4, pp. 541-544.
- Total (2012). *Material Safety Data Sheet - Impact Polystyrene*. Total Petrochemicals & Refining USA, Inc.
- Usmani, A., Roben, C., Johnston, L., Flint, G. e Jowsey, A. (2006). Tall building collapse mechanisms initiated by fire. *Proceedings of the Fourth International Workshop - Structures in Fire*, Volume 1, Aveiro.
- WALD, F. e. (2006). Experimental behaviour of a steel structure under natural fire. *Fire Safety Journal*, 509-522.
- Walton, W.D. e Budnick, E.K. (1988). *NBSIR 88-3695 Quick Response Sprinklers in Office Configurations: Fire Test Results*. Center for Fire Research, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg.

Wang, G.-Y., Li, Y.-Q., Qiu, C.-H., Han, L.-H., Yu, H.-X. e Xie, F.-D. (2014). Post-fire performance evaluation method of high-rise buildings and its application in the television cultural center, CCTV.

Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire, Xangai.

Yuen, A.C.Y., Yeoh, G.H., Alexander, R. e Cook, M. (2014). Fire scene reconstruction of a furnished compartment room in a house fire. Case Studies in Fire Safety, Vol. I, pp. 29-35.